

# بررسی وضعیت ساختاری ناحیه معدنی هیرد (جنوب بیرجند) با استفاده از تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوایی، ماهواره‌ای و مشاهدات صحرایی و ارتباط آن با کانه‌زایی طلا

نویسنده: محمدعلی قربانی\*، محمد محجل\*\*، محسن پور کرمانی\*\*\*، معصومه علیمحمدی\* و حسن خیراله‌ای\*\*\*\*

\* دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران  
 \*\* گروه زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.  
 \*\*\* دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران.  
 \*\*\*\* سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران  
 تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۷/۰۹

## چکیده

ناحیه معدنی هیرد در خاور خرد قاره ایران مرکزی و حاشیه خاوری پهنه لوت و در منتهی‌الیه باختری پهنه زمین درز سیستان واقع شده است. بخش شمالی پهنه زمین درز سیستان با راستای شمال-باختر-جنوب-خاور با پیچیدگی‌های ساختاری زیاد، محل تشکیل چند کانسار معدنی مهم بوده و از این لحاظ مطالعه آن از اهمیت چشمگیری برخوردار است. در این مقاله، به مطالعه و تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوایی و ماهواره‌ای موجود در کنار مشاهدات صحرایی برای بررسی ساختارهای سطحی و زیر سطحی و ارتباط آنها با عارضه‌های ساختاری عمده و تأثیر گذار در ناحیه (مانند پهنه زمین درز سیستان)، پرداخته شده است. علاوه بر این، پیوستگی واحدهای زمین‌شناسی و ساختاری باسن ائوسن و جوان‌تر که در بخش‌هایی توسط سنگ پوشی مرکب از نهشته‌های آبرفتی و خاک پوشیده شده نیز مورد تحقیق قرار گرفته است. در مرحله پردازش داده‌های مغناطیس‌هوایی، فیلترهای برگردان به قطب و مشتق قائم اول اعمال شده است. برای پردازش داده‌های سنجنده ASTER و بارزسازی شکستگی‌ها نیز از فیلترهای بالاگذر بارز کننده لبه استفاده شده است. تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوایی گویای وجود دو روند ساختاری اصلی شمال-جنوب و شمال-باختر-جنوب خاور در منطقه می‌باشد که این روندها از جهت گیری بخش شمالی پهنه زمین درز سیستان پیروی می‌نمایند. جالب توجه وجود رگه‌های کانه‌دار و پهنه‌های برشی-گسلی کانه‌دار و دگرسان شده در همین روندها و در محدوده همین شکستگی‌ها است. علاوه بر این، محل تراکم و نیز تلاقی شکستگی‌ها با محل کانی‌سازی‌ها انطباق خوبی نشان می‌دهد. از دیگر نتایج مطالعه داده‌های مغناطیس‌هوایی، باید به وجود یک ناهنجاری مغناطیسی حلقوی در خاور محدوده اشاره نمود که در بخش‌های باختری، این ناهنجاری به شدت متأثر از ساختارهایی با روند NNW شده و رخداد کانی‌سازی به صورت رگه‌های سیلیسی طلا دار و نیز کانی‌سازی در پهنه‌های برشی گسل‌ها، در همین محدوده به وقوع پیوسته است. تفسیر داده‌های ماهواره‌ای در کنار مشاهدات و اندازه‌گیری‌های صحرایی به عمل آمده از شکستگی‌ها و گسل‌های سطحی، علاوه بر تأیید و انطباق نسبی با دو روند ساختاری مذکور، دلالت بر وجود سومین روند ساختاری مهم شمال-خاور-جنوب-باختر در منطقه دارد که این روند اثر بسیار ضعیفی در نقشه مغناطیس‌هوایی از خود بر جای گذاشته است.

**کلیدواژه‌ها:** هیرد، زمین درز سیستان، مغناطیس‌هوایی، زمین‌شناسی ساختمانی، خطواره مغناطیسی

## ۱- مقدمه

طول جغرافیایی  $۵۹^{\circ} ۰۸'$  تا  $۵۹^{\circ} ۱۵'$  خاوری در فاصله ۱۰۵ کیلومتری جنوب بیرجند واقع شده است. این ناحیه از نظر تقسیم‌بندی ایالت‌های ساختاری پوسته ایران زمین در حاشیه شمال خاوری پهنه لوت و منتهی‌الیه باختر زمین درز سیستان (Sistan suture zone) قرار گرفته است. پهنه زمین درز سیستان، در خاور ایران و با راستای کلی شمال-جنوب، در واقع پهنه‌ای برخوردی است که حاصل بسته شدن باریکه اقیانوسی خاور ایران بین پهنه لوت و قطعه افغان در انتهای مزوزویک - ابتدای ترشیر است (Tirrul et al., 1983). بر اساس نقشه زمین‌شناسی-معدنی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ هیرد (عسکری و صفری، ۱۳۸۲)، واحد شیلی-ماسه‌سنگی ژوراسیک، قدیمی‌ترین رخنمون سنگی منطقه است که با یک دگرشیبی به توالی رسوبی کوتاه بالایی شامل واحدهای شیلی، کنگلومرای، ماسه‌سنگی، آهکی-مارنی، توف‌های آهکی و آهک ماسه‌ای تبدیل می‌شود. این توالی رسوبی، توسط یک کنگلومرای قاعده‌ای پالئوسن و یک کنگلومرای قاعده‌ای ائوسن به توالی ماگمایی ترشیر (شامل سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی) متصل می‌شود. توده‌های نفوذی با ترکیب گرانودیوریت، کوآرتز مونوزودیوریت و گابرو-نوریت با سن پس از ائوسن، در قسمتی از واحدهای آتشفشانی منطقه که به طور عمده دارای ترکیب آندزیت و توف هستند نفوذ نموده و در مواردی موجبات ایجاد دگرسانی و کانه‌زایی طلا را فراهم آورده‌اند. عمده منطقه مورد بررسی، در همین توالی آتشفشانی-

امروزه داده‌های مغناطیس‌هوایی (Aeromagnetic data) ابزار بسیار مفیدی در مطالعات زمین‌شناسی بویژه در زمینه مطالعه کانسارهای معدنی به شمار می‌روند. این داده‌ها به دلیل نمایش تغییرهای میدان مغناطیسی ناشی از رخساره‌های زمین‌شناسی، در ردیابی و مطالعه فرایندهای زمین‌شناسی رخ داده در زمین نقش منحصر به فردی دارند. این نقش بویژه در مناطق پوشیده از آبرفت به طور مشخص بارز می‌شود. از جمله رخساره‌های قابل شناسایی با استفاده از داده‌های مغناطیس‌هوایی می‌توان به تعیین محل و گسترش عمقی توده‌های نفوذی پنهان، مناطق دگرسانی، مناطق برشی، شکستگی‌های پی‌سنگی و در کل بررسی وضعیت زمین ساختی و مطالعه ارتباط آن با کانه‌زایی اشاره نمود. از آنجا که بخشی از محدوده مورد مطالعه از آبرفت پوشیده شده است و در بعضی قسمت‌ها نیز ماهیت سنگ‌شناسی و پدیده فرسایش، امکان مشاهده مستقیم ساختارهای زمین‌شناسی را با مشکل مواجه می‌کند؛ بنابراین استفاده از داده‌های مغناطیس‌هوایی در کنار داده‌های ماهواره‌ای ناحیه معدنی هیرد می‌تواند نقشی مهم در مطالعه ساختارهای سطحی و زیر سطحی عمده در منطقه و ارتباط آن‌ها با عارضه‌های ساختاری اصلی و ناحیه‌ای، داشته باشد.

## ۲- زمین‌شناسی ناحیه‌ای

ناحیه معدنی هیرد بین عرض جغرافیایی  $۳۱^{\circ} ۵۴'$  تا  $۳۱^{\circ} ۵۹'$  شمالی و

ناحیه‌ای با طول موج بلند و تداخل بین بی‌هنجاری‌های مجاور از فیلتر مشتق قائم استفاده می‌شود. مشتق قائم در واقع یک فیلتر بالاگذر (High pass) است زیرا بسامدهای بالا را نسبت به بسامدهای پایین افزایش می‌دهد. در نتیجه اثر بی‌هنجاری‌های بزرگ (بی‌هنجاری‌های بزرگ مغناطیسی دارای طول موج بلند و بسامد پایین هستند) که مربوط به منابع ژرف و منطقه‌ای هستند بر روی بی‌هنجاری‌های کوچک از بین رفته و بی‌هنجاری‌های کوچک و محلی به خوبی نمایان می‌شوند (Silva, 2003 & Neausuparp et al., 2005) (شکل ۲-ب).

#### ۴-۱. استخراج خطواره‌های مغناطیسی

در یک حالت عادی، عارضه‌های زیر منعکس کننده یک منطقه دگرشکلی در نقشه‌های مغناطیسی هوایی هستند (Korhonen et al., 2004). الف) نواحی خطی و باریک دارای مغناطیسی پایین (رنگ آبی) که یکی از معمول‌ترین حالات در نقشه‌های مغناطیسی هوایی است و معرف مناطق دارای دگرشکلی شکننده است. به عبارتی یک پهنه مغناطیسی باریک خطی با شدت پایین که به دلیل هوازدگی در طول سطح گسل خوردگی به وجود آمده و کانی‌های مغناطیسی در اثر اکسیداسیون به کانی غیر مغناطیسی تبدیل گشته‌اند. دو طرف این پهنه باریک و خطی، می‌تواند ویژگی مغناطیسی مشابهی داشته باشد.

ب) نواحی خطی و باریک دارای مغناطیسی بالا (رنگ بنفش) که ممکن است در اثر وجود یک عامل خارجی قطع شده باشد؛ می‌تواند مربوط به کانی‌های مغناطیسی رسوب کرده در سطح گسل باشد.

پ) قطع ناگهانی در عمق منابع مغناطیسی

ت) ناپیوستگی / جابه‌جایی در ناهنجاری‌های مغناطیسی به صورت آشفته که از نشانگرهای بسیار شاخص یک پهنه دگرشکلی هستند.

ج) جابه‌جایی واضح و تند در ناهنجاری‌های مغناطیسی که نشان‌دهنده پهنه‌های برشی شکننده یا همان گسل‌ها هستند.

چ) پله‌های مغناطیسی که بیانگر همبندی‌های دارای خردشدگی بالای واحدهای سنگی مختلف هستند.

در این‌گونه مطالعات، وجود تغییرهای بک‌نواخت و کم و بیش آرام در ژرفای پی‌سنگ مغناطیسی در منطقه، می‌تواند به نوعی گویای اثر ضعیف گسل‌ها در ایجاد مؤلفه جابه‌جایی قائم و یا حتی نتیجه تغییر در خواص مغناطیسی مواد ژرفایی باشد. افزون بر این، ذکر این نکته ضروری است که به طور عموم ویژگی‌های مغناطیسی مناطق دگرشکلی طی مراحل مختلف دگرگونی ممکن است دچار تغییر شوند.

در ارتباط با شناسایی شکستگی‌ها به کمک داده‌های مغناطیسی هوایی، سه حالت کلی را می‌توان در نظر گرفت:

۱. خطواره‌های مغناطیسی شناسایی شده با گسل‌های تشخیص داده شده بر روی سطح همخوانی دارد.

۲. برای خطواره‌های مغناطیسی شناخته شده، گسل همخوانی بر روی سطح شناسایی نشده است. در این مورد دو حالت را می‌توان در نظر گرفت؛ در حالت اول ممکن است در نظر گرفتن این خطواره‌ها به دلیل تفسیر نادرست ناهنجاری‌ها بوده باشد و در حالت دوم ممکن است خطواره مغناطیسی در واقع وجود داشته ولی جابه‌جایی سطحی ایجاد شده با خطواره مغناطیسی فوق به طور دقیق منطبق نبوده و یا به دلیل پوشیده بودن محدوده از آبرفت و یا ماهیت سنگ‌شناسی منطقه، در اصل برداشت نشده است.

۳. گسل‌های شناخته شده بر روی زمین که هیچ‌گونه خطواره مغناطیسی همخوانی بر روی داده‌های مغناطیسی هوایی برای آنها در نظر گرفته نشده است. برای این مورد هم

نفوذی واقع شده است. با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی - معدنی انجام شده در مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ و نتایج حاصل از آن، در نهایت ۴ محدوده امید بخش معدنی (تارگت معدنی) در این منطقه، برای انجام ادامه عملیات اکتشافی پیشنهاد شده است. شکل ۱، جایگاه منطقه مورد مطالعه در شمال خاوری پهنه لوت، واقع در مجموعه واحدهای آتشفشانی - نفوذی ترشیری و واحدهای چین‌خورده مزوزوییک را نشان می‌دهد.

#### ۳- داده‌های مورد استفاده

برداشت‌های ژئوفیزیک هوایی به سه روش مغناطیسی سنجی، الکترومغناطیسی و رادیومتری (اورانیم، پتاسیم و توریم) در بخش‌هایی از برکه بصیران و جنوب مختاران توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در سال ۱۳۸۳ صورت گرفته است. این برداشت‌ها توسط هلی‌کوپتر و با ارتفاع پرواز ۶۰ متر از سطح زمین و فاصله خطوط پرواز ۲۵۰ متر و با آزیموت  $290^{\circ}$  در منطقه و به قصد عملیات اکتشافی انجام شده است. مغناطیسی‌سنج مورد استفاده در این برداشت از نوع بخار سزیم بوده که در هنگام برداشت در ارتفاع ۴۵ متری از سطح زمین قرار داشته است. برای شناسایی خطواره‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه، از داده‌های شدت کل میدان مغناطیسی پس از اعمال فیلترهای مختلف در مرحله پردازش استفاده شده است. برای شناسایی بهتر پهنه‌های ژرفی از جمله گسل‌های منطقه، از داده‌های سنجنده ASTER که از قدرت تفکیک طیفی بالایی برخوردارند، در کنار داده‌های ماهواره‌ای IRS-pan و QuickBird-pan که دارای قدرت تفکیک مکانی بالایی هستند، استفاده شده است.

#### ۴- پردازش داده‌های مغناطیسی هوایی

داده‌های مغناطیسی هوایی پردازش شده دارای اطلاعات با ارزشی برای تفسیر عوارض زیر سطحی هستند (Neausuparp et al., 2005). یکی از مراحل پردازشی داده‌های مغناطیسی هوایی، محاسبه اثر مغناطیسی میدان مرجع وابسته به میدان جاذبه زمین (International Geomagnetic References Field: IGRF) و حذف آن از داده‌های مغناطیسی مشاهده شده (شدت کل میدان مغناطیسی) است (Silva, 2003). با اعمال فیلترهای متفاوت بر روی اطلاعات، بررسی از جهات مختلف انجام گرفته و با در نظر گرفتن اطلاعات زمین‌شناسی، منطقه مورد تعبیر و تفسیر قرار گرفته است. اولین فیلتر اعمال شده، فیلتر برگردان به قطب (Reduction To Pole) است. با استفاده از این فیلتر، میدان مغناطیسی از یک عرض مغناطیسی که در آن بردار میدان زمین مایل و شیب‌دار است به قطب مغناطیسی یعنی جایی که میدان القایی قائم است، منتقل می‌شود زیرا اگر میدان زمین مایل باشد شکل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی که به صورت القایی به وجود آمده‌اند نسبت به منابع به وجود آورنده نامتقارن خواهد بود ولی در صورتی که میدان القایی قائم باشد، بی‌هنجاری‌های به وجود آمده در اثر القاء مغناطیسی بر روی منبع خودشان قرار می‌گیرند. لذا تفسیر اساسی داده‌های مغناطیسی هوایی به طور معمول بر روی تصاویر مختلف برگردان به قطب صورت می‌گیرد (شکل ۲-الف). اعمال این فیلتر با استفاده از زاویه میل (Inclination) و انحراف مغناطیسی (Declination) صورت می‌گیرد. مقدار این زوایا در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۵۰ و  $2/6$  درجه و مقدار میانگین IGRF برابر  $47.33$  نانوتسلا بوده است. پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب، فیلتر بالاگذر مشتق اول قائم (First vertical derivative) بر داده‌ها اعمال شده است. برای حذف اثرات

کواترنری پوشیده شده و شاهد سطحی در مورد آن موجود نیست. شایان ذکر است بخشی از کانی‌سازی در منطقه در بخش‌های باختری این ساختار و در واحدهای آتشفشانی و آذرآواری رخ داده است.

## ۵- استخراج شکستگی‌های منطقه بر اساس پردازش داده‌های ماهواره‌ای

نقشه‌برداری از الگوهای ساختاری و شکستگی‌ها یکی از کاربردهای مهم علم سنجش از دور است (Sirvastav et al., 2000; Sabins, 1999). اغلب کانه‌زایی‌ها در مناطق با شکستگی بالا و بویژه در محل تلاقی این شکستگی‌ها اتفاق می‌افتد (Sabins, 1999). برای شناسایی بهتر پهنه‌های برشی از جمله گسل‌های منطقه، از داده‌های سنجنده ASTER که از قدرت تفکیک طیفی بالایی برخوردارند در کنار داده‌های ماهواره‌ای IRS-pan و QuickBird که دارای قدرت تفکیک مکانی بالایی هستند، استفاده شد. در این مطالعه تصاویر سنجنده ASTER به شماره ۱۵۰۵۰۱ که توسط ماهواره Terra در تاریخ ۲۰۰۱/۵/۱۵ برداشت شده، مورد استفاده قرار گرفته است. این تصاویر از نظر پردازشی در تراز 1B قرار دارند که معادل داده‌های رادینس در سنجنده به‌شمار می‌آیند. به منظور تبدیل به داده‌های انعکاسی و از بین بردن تأثیرات توپوگرافی و جوی، در مرحله پیش‌پردازش تصحیحات رادیومتریک روی این داده‌ها صورت گرفت. با توجه به این که در مناطق گسلی شدت تغییرات بالا است از فیلترهای بالاگذر (High pass filters) که عوارض با بسامد بالا را اجازه عبور می‌دهند؛ استفاده شده است. شناسایی خطواره‌ها بر روی تصویر ASTER با ترکیب باندی RGB=321 و با استفاده از روش تعدیل هیستوگرام (Equalization Enhancement)، صورت گرفته است و برای تسهیل در تفسیر بصری با درصد صحت بیشتر، فیلتر بالاگذر آشکارکننده لبه (Edge Sharpening) با ضرایب ماتریس مختلف  $3 \times 3$  و  $5 \times 5$  ... بر روی این تصویر، اعمال شد (علیمحمدی و همکاران، ۱۳۸۵). مراحل پیش‌پردازش و پردازش به وسیله نرم‌افزارهای ERDAS IMAGING 8.5 و ENVI 4.1، صورت گرفته است. شایان ذکر است از داده‌های ماهواره‌ای IRS و QuickBird - سنجنده Panchromatic که به ترتیب دارای قدرت تفکیک مکانی  $5/8$  و  $0/61$  متر هستند، برای تفسیر بصری بهتر و نیز در مرحله عملیات صحرایی و رسم نهایی ساختارها استفاده شده است.

پس از اعمال پردازش‌های مذکور، نقشه شکستگی‌های منطقه در محیط GIS رسم شده که در شکل ۴ به نمایش درآمده است. با بررسی نمودار گل‌سرخ شکستگی‌های دارای جلوه سطحی در محدوده مورد مطالعه، نتیجه می‌شود که عمده شکستگی‌ها به ترتیب در سه راستای مهم  $330-300$  درجه،  $070-040$  درجه و نیز NNW رخ داده‌اند (نمودار ۱-ب).

## ۶- بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، در مورد بسیاری از شکستگی‌های شناسایی شده بر اساس داده‌های مغناطیس‌هوایی، از طریق پردازش داده‌های ماهواره‌ای نیز شکستگی همخوانی قابل تشخیص است. مقایسه دو نمودار گل‌سرخ رسم شده برای دو سری شکستگی‌ها، گویای همین واقعیت است. به این ترتیب که دوروند ساختاری مهم N-S و NW-SE در منطقه به صورت ژرف و پی‌سنگی عمل نموده و اثر آنها پس از اعمال پردازش‌های مربوطه هم در داده‌های مغناطیس‌هوایی

دو حالت می‌توان در نظر گرفت؛ ممکن است ناهنجاری‌های موجود بر روی نقشه گویای وجود خطواره‌ای باشند ولی در تفسیر به عمل آمده توجه کافی به آن نشده باشد و یا تشخیص آن دشوار بوده است. در این حالت با رسم گسل یا شکستگی از روی نقشه زمین‌شناسی دارای زمین مرجع (Georeferenced) و یا تصاویر ماهواره‌ای می‌توان این کمبود را جبران نمود. هم‌چنین امکان دارد گسل‌های شناخته شده تأثیر مهمی بر روی پی‌سنگ نداشته باشند، به طور مثال در ژرفا شبی نزدیک به افق و حالت قاشقی (Listric) پیدا کنند که با توجه به فاصله خطوط پیمایش از همدیگر، اثر این گونه گسل‌ها ممکن است به خوبی مشخص نشود.

بر اساس اصولی که بیان شد، اقدام به شناسایی و تفکیک خطواره‌های مغناطیسی در منطقه و ترسیم آنها در محیط GIS شده است. چنانچه در ادامه و در بخش تفسیر داده‌های دورسنجی خواهیم دید، در مورد بسیاری از خطواره‌های مغناطیسی شناسایی شده در ناحیه معدنی هیرد، حالت اول و نیز به دلیل وجود پوشش آبرفتی در بخش‌هایی از منطقه و عملکرد فرایندهای فرسایشی در واحدهای آتشفشانی، حالت دوم صادق است.

در شکل ۳، خطواره‌های مغناطیسی شناسایی شده در ناحیه معدنی هیرد که با استفاده از نقشه شدت کل میدان مغناطیسی پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب (RTP) و مشتق اول قائم به دست آمده؛ نشان داده شده است.

بر اساس نمودار گل‌سرخ (Rose diagram) (نمودار ۱-الف)، جهت‌گیری‌های عمده این خطواره‌ها، 310-320 درجه و نیز N-S حاصل می‌شود. علاوه بر این خطواره‌هایی با جهت‌گیری 045-060 درجه نیز در نقشه مذکور دیده می‌شوند که از فراوانی زیادی برخوردار نیستند و ساختارهایی فرعی در منطقه محسوب می‌شوند که روند‌های ساختاری شاخص منطقه را قطع نموده‌اند.

## ۴-۲. ساختارهای دایره‌ای (Circular structures)

زمانی که دیابیرهای منفرد فرسایش می‌یابند و یا سطوح و ژرفای متوسط نفوذ رخنمون می‌یابند، اغلب به صورت طرح‌های کم و بیش دایره‌ای جلوه‌گر می‌شوند. این ساختارها گاهی اوقات همراه با دیگر سیماهای آذرین همانند دایک‌های حلقوی (Ring dykes)، پهنه‌های قیفی‌شکل (Cone sheets) و دایک‌های شعاعی (Radial dykes)؛ مجموعه‌های حلقوی (Ring complex) را تشکیل می‌دهند (Price & Cosgrove, 1990).

در نتیجه نفوذ ماگما در امتداد شکستگی‌های برشی‌ای که در اثر نشست کردن ماگما دچار بازشدگی شده‌اند، دایک‌های حلقوی ایجاد می‌شوند. تشکیل دایک‌های شعاعی و پهنه‌های قیفی‌شکل در نتیجه افزایش روبه‌بالای عمل فشار ماگمایی روی سنگ‌های میزبان است. دایک‌های حلقوی نتیجه شکستگی‌های ساده هیدرولیکی هستند. اما پهنه‌های قیفی‌شکل، در اثر تنش‌های دینامیکی القاء شده در پاسخ به انبساط سریع ماگما ایجاد می‌شوند (Phillips, 1974).

بنابر توضیح‌های بالا، ساختارهای حلقوی به طور معمول بازتابی از ساختارهای ژرفی و بویژه توده‌های نفوذی پنهان هستند.

همان‌طور که در نقشه خطواره‌ها (شکل ۳) دیده می‌شود، یک ناهنجاری یا ساختار حلقوی دارای شدت بالای مغناطیس (رنگ بنفش) به طول حدود ۳ کیلومتر در خاور منطقه و نیز خاور دهکده هیرد قابل شناسایی است که به احتمال در اثر نفوذ یک توده آذرین به وجود آمده است. بخش‌های باختری این ساختار، به شدت تحت تأثیر خطواره‌هایی با جهت‌گیری شمال - جنوب تا شمال باختر - جنوب‌خاور قرار گرفته و قطع شده است. در نتیجه ساختار مذکور به نسبت سایر خطواره‌های بخش‌های باختری خود از تقدم برخوردار می‌باشد. محل این ساختار به طور کامل توسط نهشته‌های

مزوزویک - ابتدای ترشیر است (Tirrul et al., 1983). سامانه گسلی نهندان که تمامی ایالت ساختاری سیستان را در بر می‌گیرد، در بخش شمالی با تغییر جهت به طرف باختر به صورت تداخلی وارد پهنه لوت شده است (شکل ۱). در پهنه‌های بُرشی وابسته به پهنه گسلی نهندان، ذخایر معدنی فراوانی بر جای گذاشته شده است که از هندسه گسل پیروی می‌کنند. ناحیه معدنی هیرد نیز در حقیقت در جنوبی‌ترین محل این تغییر روند ساختاری واقع شده که به طور کامل تحت تأثیر اُرب‌های (Splay) سامانه گسلی نهندان قرار گرفته است. بررسی نمودار گل‌سرخ شکستگی‌های پی‌سنگی مذکور به خوبی گویای وجود و تأثیر مهم شکستگی‌های با راستای N-S به پیروی از سامانه گسلی نهندان و نیز شکستگی‌های دارای راستای NW-SE به پیروی از اُرب‌های همان سامانه در این ناحیه معدنی است. علاوه بر این، خطواره‌هایی با جهت گیری ۰۶۰-۰۴۵ درجه نیز در نقشه مذکور دیده می‌شوند که از فراوانی کمتری برخوردار بوده و از لحاظ مغناطیسی، ساختارهایی فرعی در منطقه محسوب می‌شوند و منطبق بر گسل‌های معکوس و نیز گسل‌های راستالغز چپ‌گرد هستند. روند ساختاری NE-SW مشاهده شده طی تفسیر داده‌های ماهواره‌ای همراه با برداشت‌های صحرایی، اغلب منطبق بر گسل‌های معکوسی همانند گسل کمرسرخ و گسل سیه‌کمر هستند. بارز نشدن این ساختارها طی تفسیر داده‌های مغناطیس هوایی، می‌تواند گویای اثر ضعیف این دسته از شکستگی‌ها در پی‌سنگ باشد. بنابراین احتمال می‌رود این گسل‌ها در ژرفا، شبیه نزدیک به افق و حالت قاشقی پیدا کرده و در نتیجه، اثر آنها در داده‌های مغناطیس هوایی به خوبی نمایان نشده است.

ناحیه هیرد با جایگاه ویژه زمین‌ساختی که از آن یاد شد، از طرفی تحت تأثیر حرکت رو به شمال قطعه باختری از سیستم گسلی راستالغز راست‌بر نهندان؛ متحمل راندگی‌هایی (Thrusting) در راستای گسل‌های با روند خاوری - باختری و نیز چین‌خوردگی شده است. چنانچه بررسی‌های صحرایی نیز تأیید کننده وجود مؤلفه شیب‌لغز معکوس در دو گسل اصلی خاوری - باختری (گسل کوه کمرسرخ و گسل کوه سیه‌کمر) در جنوب منطقه دارد. در هر دو مورد نیز شیب صفحات گسلی حدود ۳۰ - ۲۰ درجه به سوی جنوب و سوی حرکت به شمال اندازه گرفته شده است. از طرفی اُرب‌های شمالی سامانه گسلی یادشده، با وارد آوردن توأمان نیروهای برشی - فشارشی، مسبب ایجاد سیستم‌های دگرشکلی برشی - فشارشی (Transpressional) در منطقه شده‌اند. جالب توجه این‌که دگرسانی و کانی‌زایی‌های مشاهده شده در منطقه، در یک چنین رژیم زمین‌ساختی شکل گرفته‌اند. بر پایه تفسیر داده‌های مغناطیس هوایی و ماهواره‌ای همراه با برداشت‌های صحرایی، گسل‌های با راستای NW-SE (آزموت ۳۱۰ درجه)، به عنوان پهنه‌های جابه‌جایی اصلی در سیستم دگرشکلی مذکور عمل نموده‌اند.

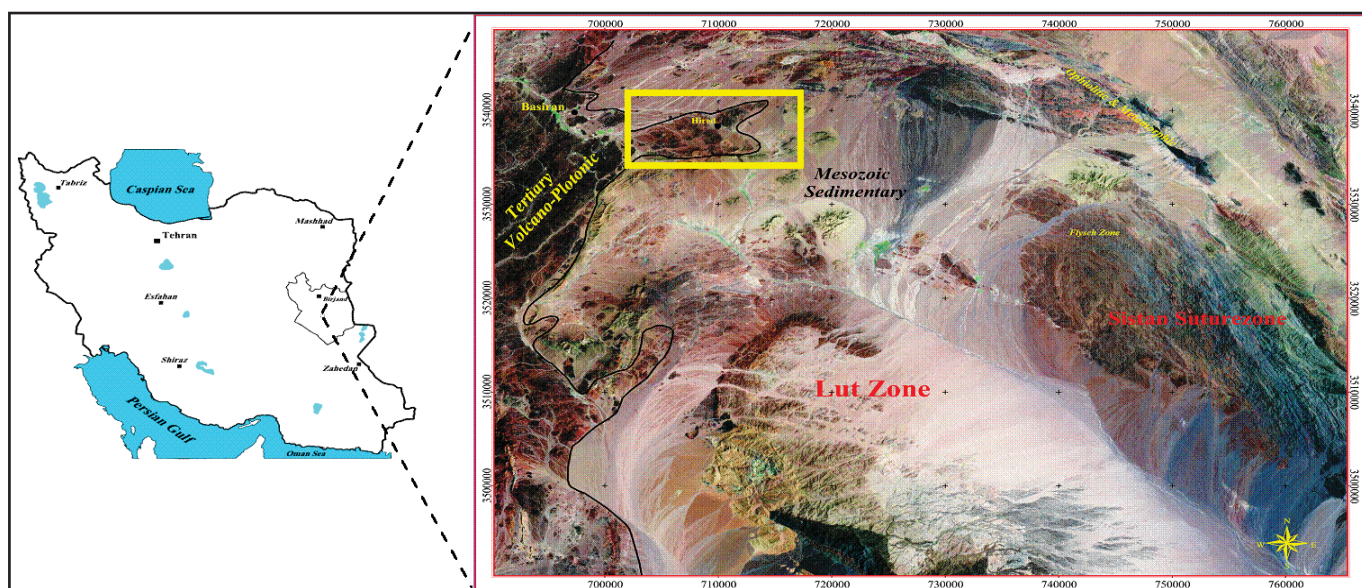
### سیاسگزاری

بدین‌وسیله از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور بویژه گروه ژئوفیزیک هوایی که نهایت همکاری را در خصوص در اختیار گذاشتن داده‌های ژئوفیزیک منطقه داشته‌اند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

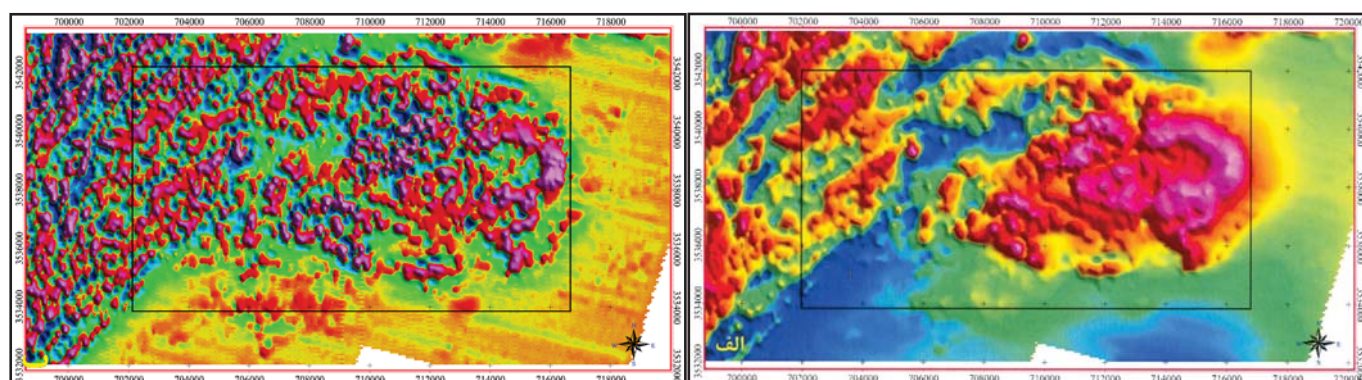
و هم در داده‌های ماهواره‌ای به خوبی نمایان شده است. یک روند ساختاری مهم دیگر جهت‌گیری NE-SW است که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به خوبی نمایان گشته ولی طی تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوایی اثر بسیار ضعیف و فرعی از خود نشان می‌دهد که ناشی از عدم تأثیر و یا تأثیر ضعیف این دسته از شکستگی‌ها بر روی پی‌سنگ است.

از لحاظ میزان اهمیت خطواره‌های مغناطیسی شناسایی شده و ارتباط آنها با کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه باید گفت که نواحی کانه‌دار و مهم از نظر زمین‌شناسی اقتصادی، همخوانی و ارتباط مکانی نزدیکی با محل تراکم شکستگی‌های پی‌سنگی نشان می‌دهند و در واقع مناطق امیدبخش اکتشافی طلای معرفی شده در منطقه با محل تقاطع دسته‌جات مختلف و نیز محل افزایش تراکم شکستگی‌ها؛ همخوانی جالب توجهی نشان می‌دهند. کانی‌سازی در محدوده اکتشافی شماره (۱) در طول یک پهنه بُرشی - گسلی در دامنه‌های شمالی و خاوری کوه سیه‌کمر رخ داده است. دو گسل اصلی در این محدوده، گسل‌های خاور کوه سیه‌کمر و گسل کوه سیه‌کمر؛ به‌عنوان معیری مناسب برای راه‌یابی محلول‌های کانه‌دار عمل نموده‌اند. گسل خاور سیه‌کمر با حدود ۶۷۰۰ متر طول و با راستای شمال باختر - جنوب خاور است که دارای سازوکار امتدادلغز راست‌گرد همراه با مؤلفه شیب‌لغز معکوس است. گسل سیه‌کمر نیز به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین گسل‌های محدوده مطالعاتی، با حدود ۱ کیلومتر طول در دامنه‌های شمالی کوه سیه‌کمر در جنوب باختر هیرد واقع شده که توسط یک سری شکستگی‌های شمالی - جنوبی قطع شده است. راستای عمومی گسل دارای آرموت ۰۸۰-۰۶۰ درجه است که با شیبی برابر ۳۵-۲۵ درجه به سوی جنوب خاور دارای سازوکار معکوس است. همان‌گونه که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، اثر پهنه‌های بُرشی - گسلی مذکور و نیز شکستگی‌های شمالی - جنوبی قطع‌کننده گسل معکوس سیه‌کمر، با استفاده از تفسیر داده‌های مغناطیس هوایی و ماهواره‌ای نمایان گشته است. در محدوده اکتشافی شماره ۳ نیز قسمتی از کانی‌سازی در طول یک پهنه سیلیسی به طول ۸۰۰ متر و با راستای شمالی - جنوبی که به‌طور دقیق منطبق بر یک پهنه باریک دارای حداقل مغناطیس (رنگ آبی) است رخ داده است؛ پهنه‌ای گسلی که به نظر می‌رسد معیری مناسب برای راه‌یابی محلول‌های ماگمایی - گرمایی کانی‌ساز به سطح زمین بوده است. منشأ محلول‌های کانه‌دار مذکور توده‌های گرانیتویدی واقع در بخش خاوری محدوده اکتشافی شماره ۱ است (علیمحمدی، ۱۳۸۶). به غیر از دو مورد یاد شده در بالا، در سایر موارد نیز انطباق مناسبی بین پهنه‌های دگرسان شده و کانه‌دار با خطواره‌های مغناطیسی شناسایی شده وجود دارد به‌طوری‌که جهت‌گیری پهنه‌های بُرشی - گسلی کانه‌دار و دگرسان‌شده و نیز رگه‌های کانه‌دار منطقه به طور کامل مشابه یکی از دو جهت‌گیری شاخص شکستگی‌های پی‌سنگی یعنی NW-SE است (نمودار ۲).

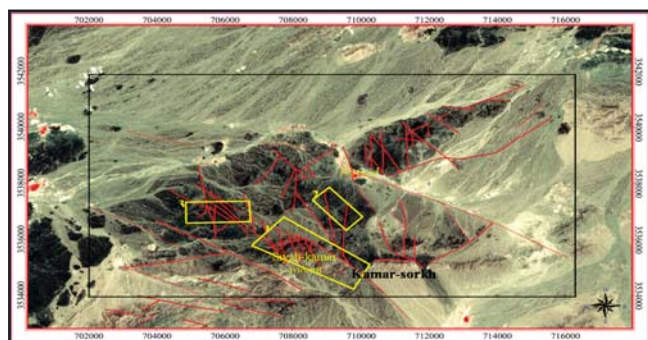
همان‌طور که ذکر شد، محدوده اکتشافی هیرد در خاور خُرد قاره ایران مرکزی و حاشیه خاور - شمال‌خاوری پهنه لوت و در نزدیکی (منتهی‌الیه باختری) پهنه زمین‌درز سیستان، واقع شده است. پهنه زمین‌درز سیستان، در خاور ایران و با راستای کلی شمال - جنوب، در واقع پهنه‌ای برخوردی است که حاصل بسته‌شدن باریکه اقیانوسی خاور ایران بین پهنه لوت و قطعه افغان در انتهای



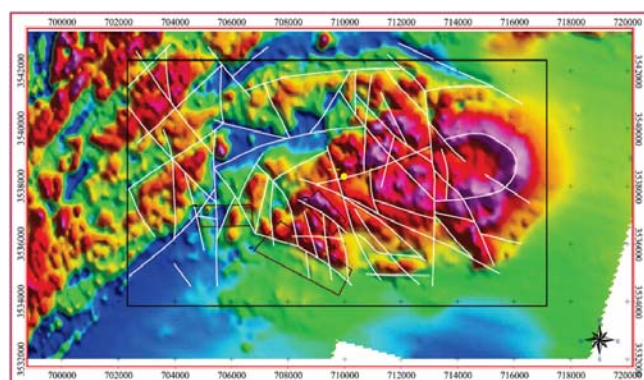
شکل ۱- موقعیت ناحیه مورد مطالعه (کادر زرد) در شمال خاور پهنه لوت (جنوب بیرجند) و در حاشیه باختری پهنه زمین درز سیستان، واقع در مجموعه واحدهای آتشفشانی - نفوذی ترشیری و رسوبی مزوزویک



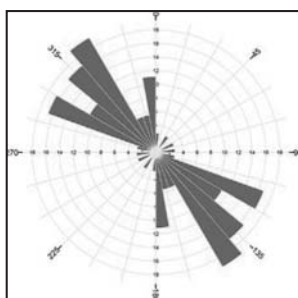
شکل ۲- الف) نقشه شدت کل میدان مغناطیسی (برگردان به قطب شده) ب) نقشه مشتق اول قائم؛ کادر مشکی محدوده مورد مطالعه را نشان می دهد. (مناطق با رنگ بنفش، از بیشینه شدت مغناطیس و مناطق با رنگ آبی، از میزان کمینه آن؛ برخوردار هستند.)



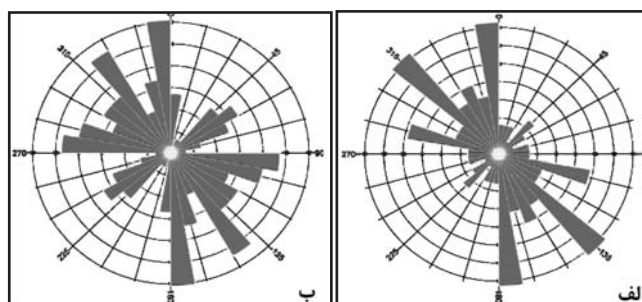
شکل ۴- نقشه مجموع شکستگی های منطقه با استفاده از پردازش داده های ماهواره ای و برداشت های صحرایی که روی تصویر رنگی RGB:321 سنجنده ASTER، به نمایش آمده است. کادرهای رنگین، معرف نواحی امیدبخش اکتشافی طلا با شماره های ۱، ۲ و ۳ هستند. خطوط نقطه چین سرخ، معرف شکستگی های احتمالی و پنهان هستند.



شکل ۳- نقشه خطواره های مغناطیسی حاصل از تفسیر نقشه RTP و مشتق اول قائم، کادرهای کوچک، معرف نواحی امیدبخش اکتشافی طلا با شماره های ۱، ۲ و ۳ هستند.



نمودار ۲- نمودار گل سرخی رگه‌های سیلسی و پهنه‌های گسلی، کانه‌دار و دگرسان شده



نمودار ۱- نمودارهای گل سرخی الف) خطواره‌های مغناطیسی حاصل از تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوایی و ب) مجموع شکستگی‌های دارای جلوه سطحی حاصل از پردازش داده‌های ماهواره‌ای و برداشت‌های صحرایی ناحیه معدنی هیرد

### کتابنگاری

- عسگری، ع. و صفری، م.، ۱۳۸۲- گزارش نقشه زمین‌شناسی معدنی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ ناحیه امید بخش معدنی طلای هیرد (شمال باختر نهبندان)، طرح اکتشافات مواد معدنی در جنوب خراسان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- علیمحمدی، م.، ۱۳۸۶- کانی‌شناسی، ژئوشیمی، دورسنجی و ژئز کانسار طلای هیرد (جنوب بیرجند)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شهید بهشتی، ۲۴۵ صفحه.
- علیمحمدی، م.، بهنیا، پ.، خاکزاد، ا. و قربانی، م.ع.، ۱۳۸۵- شناسایی و تفکیک کانی‌های دگرسانی هیدروترمال همراه با کانه‌زایی طلا به کمک پردازش داده‌های سنجنده ASTER در ناحیه معدنی هیرد (جنوب بیرجند)، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- قربانی، م.ع.، ۱۳۸۷- تحلیل ساختاری ناحیه معدنی هیرد (جنوب بیرجند) و پتروفابریک پهنه‌های بُرشی طلادار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی ساختمانی، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۰۶ صفحه.

### References

- Korhonen, K., Paanaen, M. & Paulamaki, S., 2004- Interpretation of lineaments from airborne geophysical and topographic data, Geological Survey of Finland.
- Neawsarp, K., Charusiri, P. & Meyers, J., 2005- New processing of airborne magnetic and electromagnetic data and interpretation for subsurface structures in the Loei area, Northeastern Thailand, Science Asia, 31: 283-298.
- Phillips, W.J., 1974- The dynamic emplacement of cone sheets, Tectonophysics, 24: 69-84.
- Price, N.J. & Cosgrove, J.W., 1990- Analysis of geological structures, Cambridge University Press, 502 p.
- Sabins, F.F., 1999- Remote sensing for mineral exploration, Ore Geology Reviews, 14: 157-183.
- Silva, A.M., Pires, A.C. & McCaffery, A., 2003- Application of airborne geophysical data to mineral exploration in the uneven exposed terrains of the Rio Das Velhas greenstone belt, Revista Brasileira de Geociencias, 33: 17-28.
- Sirvastav, S.K., Bhattacharya, A., Kamaraju, M.V.V., Sreenivasa Reddy, G., Shrimal, A.K., Mehta, D.S., List, F.K. & Burger, H., 2000- Remote sensing and GIS for locating favourable zones of lead-zinc-copper mineralization in Rajpura-Dariba area, Rajasthan, India, International Journal of Remote sensing, 21, N. 17: 3253-3267.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J. & Camp, V.E., 1983- The Sistan suture zone of eastern Iran, Geological Society America Bulletin, 94: 134-150.