IRANIAN MINES AND MINING INDUSTRIES DEVELOPMENT AND RENOVATION ORGANIZATION

سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران

بررسی زمین‌شناسی- اکتشافی حفاری‌های عمیق ایران مرکزی از دیدگاه اکتشاف ذخایر پنهان

خلاصه گزارش مطالعات طرح

شماره قرارداد ۳۹۴۰۹ تاریخ ۱۳۹۸/۱۲/۲۷

دانشگاه تهران

سروش مدبری

تیرماه ۱۴۰۱

شناسنامه طرح

عنوان قرارداد: بررسی زمین‌شناسی- اکتشافی حفاری‌های عمیق ایران مرکزی از دیدگاه اکتشاف ذخایر پنهان

شماره قرارداد: ۳۹۴۰۹ تاریخ ۱۳۹۸/۱۲/۲۷

کارفرما: سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو)

پژوهشگر: دانشگاه تهران

مدت قرارداد: ۱۸ ماه

مجری طرح: دکتر سروش مدبری

عنوان گزارش: خلاصه گزارش مدیریتی طرح

ویرایش: اول

شماره گزارش: XXI-1-S01

تاریخ: ۱۴۰۱/۰۴/۱۰

تهیه‌کنندگان: دکتر داود رئیسی، دکتر سروش مدبری

بررسی و تصویب: دکتر سروش مدبری

فهرست مطالب

۱. پیشگفتار ۱

۲. ضرورت انجام پروژه و جایگاه مطالعات اکتشافی ژرف ۱

۳. پیشینه طرح ۲

۴. اهداف و روند انجام پروژه ۳

۵. زمین‌شناسی منطقه آنومالی آهن 21A ۴

۶. مطالعات میدانی و برداشت (لاگینگ) گمانه‌ها ۵

۷. پتروگرافی ۶

۸. شیمی کانی ۶

۹. ژئوشیمی و پتروژنز، مطالعات ایزوتوپی و سن‌سنجی ۷

۱۰. نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۰

مدل تشکیل و جایگاه ژئودینامیکی آن ۱۰

سن‌سنجی و تفکیک زمانی فازهای کانه‌زایی – سنگ‌شناسی ۱۲

تعیین پتانسیل کانه‌زایی احتمالی آهن و دیگر عناصر در آنومالی ۲۱ ..... ۱۲

معرفی عوامل کنترل‌کننده شکل‌گیری آنومالی ۱۳

پتانسیل عناصر جزئی و خاکی کمیاب و کانی‌های مستقل احتمالی برای این عناصر ۱۴

رده بندی و مدل تشکیل کانسار ۱۴

جمع‌بندی و پیشنهادها ۱۹

تشکر و قدردانی

انجام یک طرح پژوهشی بزرگ با بخش‌های مطالعاتی گسترده و فازهای صحرایی، نمونه‌برداری، آزمایشگاهی و تحلیلی فراوان، نیازمند یک گروه پژوهشی کارآزموده و توانمند، صرف زمان لازم و ایجاد ارتباط، به‌ویژه در سطح بین‌المللی دارد تا بتوان کاری با استانداردهای مناسب تولید کرد.

پژوهش حاضر، در شرایطی انجام شد که به محض ابلاغ طرح، پاندمی کووید ۱۹ سراسر جهان را فراگرفت و به مدت حدود دو سال، امکان انجام بسیار فعالیت‌ها را گرفته یا محدود کرد. مطالعات صحرایی و بازدید از معادن، لاگ‌برداری و نمونه‌برداری در شرایطی انجام شد که سفرهای بین استانی متوقف بود. نیروهای کاری در انجام فعالیت‌ها در محیط دانشگاه محدودیت داشته و آزمایشگاه‌های معتبر جهانی که انتظار می‌رفت آزمایش‌های پیشرفته و دقیق در آنجا انجام شود، به مدت حدود دو سال تعطیل شدند.

به‌رغم هم این مشکلات، تیم پژوهشی از ابتدای سال ۱۳۹۹ و بلافاصله پس از ابلاغ طرح، فعالیت خود را آغاز کردند و توانستند بر اساس برنامه زمان‌بندی ارائه شده، مرحله اول طرح را به خوبی انجام دهند و پس از آن نیز با تاخیری ناگزیر، و انتظار برای باز شدن آزمایشگاه‌ها، خوشبختانه و با یاری خداوند، مطالعات به پایان رسید و گزارش حاضر به عنوان نتیجه این مطالعات تقدیم کارفرمای محترم گردید.

در اجرای این طرح، تیم پژوهشی داخلی و بین‌المللی، مجری طرح را یاری دادند که از همه ایشان کمال تشکر را دارم.

در درجه نخست و بالاتر از همه، همراهی و پشتیبانی کارفرما و ناظر محترم طرح، جناب آقای دکتر رضا ملاطاهری، مهندس شهرام ادیب، دکتر فرهاد فرشاد، دکتر ایمان معصومی، شایان قدردانی ویژه است که با حمایت و راهنمایی‌های ارزنده خود، امکان انجام این پژوهش را فراهم کردند. همچنین از تیم فنی مشاوره نظارتی، آقایان مهندس برنا، دکتر نیرومند، مقصودی، بهار فیروزی و تاج الدین برای نظراتی که به بهتر شدن گزارش و مطالعات انجامید تشکر می‌کنم.

دکتر داود رئیسی، محقق جوان و بسیار پرتلاش که در جایگاه دستیار مجری، در کلیه مراحل از طراحی پروژه و برنامه‌ریزی تا مطالعات صحرایی، هماهنگی آزمایشگاه‌ها و در نهایت تفسیر و تحلیل اطلاعات و نگارش گزارش‌ها نقش اساسی داشتند که از همکاری صادقانه ایشان بسیار سپاسگزارم. خانم دکتر نیلوفر نایبی، علیرغم مشغله کاری، وقت بسیار زیادی را در اختیار طرح گذاشتند و در مراحل نمونه‌برداری و آنالیز و تفسیر و نگارش همکاری صمیمانه‌ای داشتند که بدون حضور ایشان، امکان انجام بسیاری آنالیزها (که شخصا در آزمایشگاه دانشگاه کلاستال انجام دادند) فراهم نمی‌شد.

همکاران دیگر طرح در بخش‌های مختلف همکاری شایان قدردانی داشتند که در اینجا لازم می‌دانم از آقایان مهندس پیمان پورنیک، بهنام قلی‌پور، محمد لطفی، دکتر سعید حاج‌صادقی، دکتر شهروز بابازاده، دکتر محسن رنجبران، خانم‌ها مهندس الناز گراوندی، دکتر مهسا تشکر و پریناز یزدی صمیمانه تشکر کنم.

در انجام طرح از مشاوره مستقیم و غیرمستقیم خالصانه و دوستانه بزرگانی همچون دکتر محمد لطفی، دکتر نعمت‌الله رشیدنژاد عمران، دکتر منصور قربانی و برخی بزرگانی که تمایل به ذکر نامشان نداشتند، بهره برده شد که وظیفه خود می‌دانم از ایشان تشکر کنم.

در پایان، مشاوران و همکاران خارجی طرح پروفسور لمان از دانشگاه کلاستال، پروفسور پیترز از دانشگاه گوتینگن، پروفسور چو از دانشگاه ترینیتی کالج دوبلین، پروفسور دانتونیو از دانشگاه ناپل، پروفسور شینجو از دانشگاه اوکیناوا، پروفسور ژائو از آکادمی علوم چین، و دیگران کمال تشکر را دارم. همکاری صمیمانه ایشان، سطح این پژوهش را از یک کار ملی به بین‌المللی ارتقا داد.

سروش مدبری

مجری طرح

تیرماه ۱۴۰۱

چکیده

ناحیه معدنی بافق، بخشی از فلات ایران مرکزی و بزرگ‌ترین ایالت فلززایی آهن در ایران با بیش از ۲۰۰۰ میلیون تن کانسنگ آهن است و مهم‌ترین ذخایر آهن ایران شامل کانسارهای چادرملو، چغارت، سه چاهون، میشدوان، ناریگان، لکه سیاه، اسفوردی، گزستان و آنومالی‌های متعدد دیگر از جمله آنومالی آهن 21A را در خود جای داده است. پژوهش حاضر به منظور بررسی زمین‌شناسی- اکتشافی ذخایر ژرف در منطقه و بررسی تکامل پتروژنتیکی و فلززایی آنومالی آهن 21A انجام گرفته است.

آنومالی آهن 21A شامل سکانسی از واحدهای رسوبی متشکل از واحد آواری ریزدانه با ترکیبی از مادستون، شیل و سیلتستون مزوزوییک و یک سکانس واحدهای آذرین - دگرگونی، عمدتا با ترکیب مونزونیت، کوارتزمونزونیت تا انواع شیست همراه با کانه‌زایی آهن مگنتیتی است. داده‌های ژئوشیمیایی سنگ کل حاکی از آن است که سنگ‌های پلوتونیک مورد مطالعه، گستره‌ای از دیوریت تا گرانودیوریت و عمدتا مونزونیتی دارند و نتایج حاصل از سن‌سنجی زیرکن به روش U-Pb سنی بین ۵۳۱ تا ۵۳۹ میلیون سال را نشان داده است. الگوی بهنجارشده عناصر خاکی کمیاب برای سنگ‌های نفوذی-نیمه‌نفوذی آنومالی آهن 21A، مشابه ویژگی‌های ژئوشیمیایی کمان‌های ماگمایی در محیط فرورانش است.

ترکیب مگنتیت‌های مورد مطالعه با ترکیب مگنتیت‌های نوع کایرونا همخوانی دارد و ایزوتوپ استرانسیم آنها در محدوده نزدیک به آرایه‌های گوشته‌ای قرار دارند که به دلیل دگرسانی، تغییراتی را از خود نشان می‌دهد. شیمی کانی نمونه‌های مگنتیتی حاکی از قرارگیری آنها در محدودهٔ کانسارهای مگنتیت - آپاتیت و تبلور در یک محیط ماگمایی- گرمابی دارد.

آپاتیت‌های آنومالی 21A با تفکیک واضح از کربناتیت‌ها، غالباً در محدوده سنگ‌های مافیک و کانسارهای آهن تیپ کایرونا واقع شده‌اند که این امر به نقش احتمالی توده‌های نفوذی مافیک در زایش کانسارهای مگنتیت-آپاتیت در ناحیه بافق اشاره دارد. نتیجه‌گیری حاصل شده از آنالیز ایزوتوپ اکسیژن سه‌گانه مگنتیت نشانگر ماهیت سیالات ماگمایی است که با سنگ‌های تبخیری/فسفریت ها برهم‌کنش داشته‌اند.

اطلاعات به‌دست آمده از مطالعات حاضر، حاصل حفاری‌های ژرف ابتکاری در منطقه‌ای بکر بوده که امکان دسترسی به نمونه‌های دست‌نخورده را فراهم کرده است. در این پژوهش، در سکانسی دست نخورده، نمونه‌برداری سیستماتیکی انجام شد که نشانگر امیدبخش بودن کانی‌زایی و احتمال یافتن کانسارهای مشابه در دیگر مناطق زون بافق است و به همین دلیل، یافته‌های آن بهتر می‌تواند راهگشای پژوهش‌های آتی باشد.

مطالعات سن‌سنجی و پتروژنتیک و نتایج حاصل از مطالعات ژئوشیمی و کانه‌نگاری کانسنگ نشان داد که برای تشکیل یک کانسار عظیم، نیاز به حضور سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی مانند آنچه در چادرملو، چغارت، گل‌گهر و ... دیده می‌شود نیست و توده نفوذی می‌تواند پس از رخداد فعالیت‌های گرمابی درون‌زاد، میزبان کانه‌زایی باشد.

شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، بر اساس شواهد حضور یک توده مدفون اکسید آهن با توجه به مطالعات ژئوفیزیکی اولیه و حفاری بی‌فرجام شرکت تکنواکسپورت در سال‌های پیش، اقدامی متهورانه و پیشگام برای حفاری در منطقه‌ای ناشناخته انجام داد و برای اولین بار در کشور، ژرف‌ترین گمانه‌های کشور را در این منطقه حفاری کرد. پس از حفاری نافرجام گمانه ۳۲۱، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، با بررسی دقیق مطالعات ژئوفیزیکی انجام شده، مکانیابی مجددی برای نقاط حفاری انجام داد و حفاری سه گمانه ژرف را در دستور کار قرار داد.

مطالعات انجام شده در این پژوهش که با کمک دانشگاه‌های **کلاستال و گوتینگن آلمان، ترینیتی کالج دوبلین ایرلند، ناپل و فرارا ایتالیا، توهوکو و ریوکیوس ژاپن، و آکادمی علوم چین** در استانداردی بسیار بالا انجام شد، یافته‌های علمی زیادی در دسترس قرار داد که می‌تواند راهگشای مطالعات بعدی باشد.

در شرایطی که استخراج در عمق ۱۵۰۰ متری ممکن است غیراقتصادی به نظر برسد، اما حضور یک توده عظیم آهن در منطقه، می‌تواند پارامترهای اقتصادی را به شدت تحت تاثیر قرار دهد، کما اینکه معادن دیگری نیز در جهان به شیوه زیرزمینی و در مقیاس بزرگ در حال بهره‌برداری هستند.

لذا این عملیات ویژه و مطالعات انجام شده بر روی نمونه‌های فراهم شده از آن، چشم اندازی نو فراروی صنایع و معادن آهن کشور قرار می‌دهد که در مناطق مستعد با انجام مطالعات ژئوفیزیک هوابرد با دقت بالا و نیز حفاری‌های هدفمند و شناسایی توده نفوذی، به اهداف اکتشافی مهمی مانند آنومالی حاضر دست یابند.

حفاری‌های انجام شده در منطقه آنومالی ۲۱، عملیاتی پیشگام در کشور بوده که با دیدگاهی آینده‌نگر، آن هم برای آینده‌ای نزدیک، انجام گرفت و با توجه به تهی شدن ذخایر کشور و نیاز شدید به منابع معدنی برای این جمعیت رو به رشد، می‌بایست در دیگر نقاط کشور هم صورت پذیرد. این عملیات نشان داد که امکان حضور ذخایر عظیم در رده جهانی در مناطق دارای پتانسیل وجود دارد.

شرح خدمات انجام شده در این طرح، می تواند الگویی برای مطالعات آتی این گونه کانسارهای ژرف باشد که با توجه به افزایش نیاز و کاهش ذخایر، کشور ما و دیگر مناطق جهان، در آینده نزدیک، ناگزیر به سمت آنها خواهد رفت. نتیجه مهم این طرح، این جمله معروف اکتشافی است که :

اکتشاف هزینه نیست، سرمایه‌گذاری است

۱. پیشگفتار

گزارش حاضر بخشی از شرح خدمات قرارداد به شماره ۳۹۴۰۹ مورخ ۱۳۹۸/۱۲/۲۷ با عنوان **بررسی زمین‌شناسی- اکتشافی حفاری‌های عمیق ایران مرکزی از دیدگاه اکتشاف ذخایر پنهان** در محدوده آنومالی آهن 21A بین سازمان توسعه و نوسازی معادن ایران (ایمیدرو) و دانشگاه تهران است که با سفارش و نظارت شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران انجام شد.

محدوده آنومالی آهن 21A بر اساس پروانه اکتشاف شماره ۲۳۰۸۴ به منظور بررسی فعالیت‌های اکتشافی از سوی سازمان صنعت، معدن و تجارت استان یزد در اختیار سازمان تهیه و تولید مواد معدنی ایران قرار داده شد. در این محدوده، شرکت روسی تکنواکسپورت برداشت ژئوفیزیک هوایی و زمینی را انجام داده و یک گمانه اکتشافی به نام ۳۲۱ و به عمق ۱۲۰۱ متر حفاری شد. با توجه به اینکه مطالعات ژئوفیزیک عمق آنومالی مغناطیسی را بیش از ۱۲۰۰ متر نشان داد و گمانه حفاری شده به عمق مورد نظر نرسیده بود، به همین دلیل، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران داده‌های موجود را بازنگری کرد تا با انجام حفاری جدید ژرف، به ماهیت این آنومالی دست یابد.

با در نظر گرفتن عمق و حجم بسیار مناسب حاصل شده از مغزه‌های حفاری سه گمانه، به منظور مطالعات گسترده زمین‌شناسی- ژئوشیمیایی- کانه‌زایی و ... و ارائه راهکارهای اکتشافی ادامه پروژه حفاری، پژوهش حاضر تعریف و اجرا شد تا شاید بتوان با شناخت بیشتری آنومالی و ارتباط آن با سایر کانسارهای منطقه حفاری‌های بیشتر را دنبال کرد.

۲. ضرورت انجام پروژه و جایگاه مطالعات اکتشافی ژرف

ذخایر مهم و بزرگ کشور شناسایی شده و امکان یافتن ذخایر عظیم جدید در کلاس جهانی، بسیار دور از ذهن است. لذا نیاز به اکتشاف ذخایر پنهان و ذخایر ژرف در کشور گریزناپذیر است و در این راستا، به دلیل ناکارامدی روش‌های اکتشاف ژئوفیزیکی عمقی، حفاری گمانه‌های عمیق در مناطق مستعد بهترین و در واقع تنها راهکار پیش رو است.

ارزیابی مطلوب‌ترین مناطق برای اکتشاف مواد معدنی و ذخایر پنهان همواره نگرانی عمده زمین‌شناسان اکتشافی بوده است. کشف این ذخایر زمان و منابع قابل توجهی را صرف می‌کند و تنها در موارد کمی محدوده‌های اکتشاف شده، در نهایت به یک معدن تبدیل شده اند. شناخت و کشف آنها نیازمند آن است که شرکت‌های بزرگ با تکنیک‌های اکتشافی پیشرفته و با حفر گمانه‌های عمیق به تاریخچه شکل‌گیری دقیق‌تر توده‌های کانه‌دار بپردازند. شناخت دقیق از بخش بالایی پوسته، ساختار پوسته و تحولات ژئودینامیکی در زون‌های ساختاری-رسوبی از مزیت‌های چنین حفاری‌هایی است. به طور کلی **اکتشافات ذخایر پنهان** براساس مطالعات **ژئوفیزیکی عمیق، حفر گمانه‌های عمیق** برای شناخت پوسته، انجام **مطالعات متالوژنیکی- ژئودینامیکی** و ارائه **مدل‌های اکتشافی نوآورانه** بر مبنای مفاهیم جدید متالوژنی است.

زون فلززایی بافق- ساغند با توجه به پتانسیل بالای کانه‌زایی، سن و جنس سازندهای زمین‌شناسی، سال‌ها علاوه بر دیدگاه‌های اکتشافی، از دید پتروژنتیکی و بررسی تاریخچه تحولات پوسته زمین‌شناسی ایران مورد توجه زمین‌شناسان و پژوهشگران بوده است. اما همچنان نکات مبهم بسیاری در چگونگی شکل‌گیری این کانسارها و راهبردهای اکتشافی برای شناسایی کانسارهای پنهان این بخش بویژه اکتشاف معادن و آنومالی‌های آهن وجود دارد که مستلزم توجه ویژه می‌باشد.

به رغم مطالعات زیاد در زون فلززایی بافق- ساغند جایگاه فرایندهای آذرین و دگرگونی که بیشتر ذخایر فلزی ایران همراه با این فرایندها است ناشناخته مانده است. عدم دسترسی به داده‌های عمقی و کمبود مباحثی همچون مطالعات ایزوتوپی و سن‌سنجی سبب‌ساز ایجاد تحلیل‌های مختلف در ارتباط با فرایندهای درگیر در شکل‌گیری این زون شده است.

حفاری‌های انجام شده در منطقه آنومالی ۲۱، عملیاتی پیشگام در کشور بوده که با دیدگاهی آینده‌نگر، آن هم برای آینده‌ای نزدیک، انجام گرفت و با توجه به تهی شدن ذخایر کشور و نیاز شدید به منابع معدنی برای این جمعیت رو به رشد، می‌بایست در دیگر نقاط دارای پتانسیل کشور هم صورت پذیرد و الگویی برای کارهای بعدی باشد.

نکته حائز اهمیت در پژوهش حاضر، فراهم شدن امکان بررسی مغزه‌های آنومالی آهن 21A (XXI) و طبعا دسترسی به سنگ‌هایی با عمق حدود ۲۰۰۰ متر در ایران مرکزی برای اولین بار است. این آنومالی که پیشتر بر مبنای مطالعات ژئوفیزیکی اکتشاف شده بود، اخیرا توسط شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران مورد حفاری اکتشافی قرار گرفته و گمانه اول آن در عمق ۱۶۱۰ متری به کانسنگ **آهن مگنتیتی به ضخامت نزدیک به ۲۰۰ متر** برخورد نموده است که طبعا بررسی و مقایسه آن با دیگر کانسارهای آهن از یکسو و مطالعات پتروژنتیکی (ژئوشیمیایی، سن‌سنجی، ایزوتوپی) سنگ‌های دربرگیرنده آن می‌تواند بر روشن‌شدن سیمای کانه‌زایی و ماگماتیسم این مناطق کمک‌ساز باشد.

بررسی مغزه‌های به‌دست آمده، تهیه و مطالعه مقاطع نازک و نازک صیقلی متعدد، آنالیزهای ژئوشیمیایی، مطالعات ایزوتوپی در آزمایشگاه‌های معتبر و تعیین سن نمونه‌های انتخاب شده از واحدهای سنگ‌شناسی و کانه‌زایی اصلی، می‌تواند ما را در رسیدن به این هدف کمک نماید. همچنین در افقی بالاتر مشخص شدن مجموعه تحولاتی که در این منطقه و مقایسه آن با سایر سرزمین‌های مجاور، می‌تواند راهگشایی بر بازسازی بخش ایرانی ابرقاره گندوانا و تکمیل کننده مطالعات پیشین باشد.

۳. پیشینه طرح

محدوده طرح در گذشته توسط شرکت روسی تکنواکسپورت مورد مطالعه قرار گرفته و طی آن برداشت ژئوفیزیک هوایی و زمینی انجام گرفت و بر اساس نتایج این عملیات، یک گمانه اکتشافی به شماره ۳۲۱ به عمق ۱۲۰۱ متر در سال ۱۹۷۸-۱۹۷۹ در این منطقه حفاری شد. با توجه به اینکه مطالعات ژئوفیزیک عمق آنومالی مغناطیسی را بیش از ۱۲۰۰ متر نشان داد، و گمانه حفاری به عمق مورد نظر نرسید، به نظر می‌رسید که اگر این آنومالی کانه‌دار باشد، توده مزبور باید خیلی بزرگ بوده و به همین علت لازم است کارهای اکتشافی ادامه یابد تا ماهیت این آنومالی تعیین شود. ژئوفیزیک زمینی مگنتومتری، آنومالی مغناطیسی

را در بخش شمال غربی محدوده تایید کرد و حفاری دو گمانه به عمق ۱۵۰۰ متر در دستور کار قرار گرفت و دو گمانه SHA1 و SHA2 حفاری و براساس اطلاعات به‌دست آمده و برای تعیین گسترش ماده معدنی، گمانه سوم SHA3 نیز حفاری شد.

در سال ۱۳۹۵ مطالعه این گمانه‌ها به مهندسین مشاور کوشامعدن واگذار شد. سپس در سال ۱۳۹۸ مطالعات علمی-پژوهشی محدوده و عملیات یاد شده در سامانه ساتع به فراخوان پژوهشی گذاشته شد و قرارداد آن بین دانشگاه تهران و سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) امضا و از ابتدای سال ۱۳۹۹ آغاز گردید.

گمانه ۳۲۱ در سال‌های ۱۹۷۸-۱۹۷۹ به عمق ۱۲۰۱ متر در مرکز سطحی آنومالی مشخص شده توسط تکنواکسپورت حفاری شد و به دلیل تعویض تجهیزات حفاری متوقف شد اما دیگر ادامه نیافت. گمانه ۳۲۱ ابتدا به صورت قائم حفر و سپس به‌تدریج به سمت غرب متمایل شده و در عمق ۷۰۰ متری با زاویه ۲۷ درجه نسبت به حالت قائم قرار گرفت. مطالعات شرکت تکنواکسپورت نشان داد که توده آشفته‌کننده مگنتیت در عمق ۱۲۰۰ متری زیر سطح و در سری‌های سنگ بستر قدیمی قرار دارد. اگر این آنومالی ماهیت کانه‌دار داشته باشد، توده مزبور باید خیلی بزرگ بوده و به همین علت و با وجود عمق زیاد توده و پیچیده بودن آن، لازم است کارهای اکتشافی ادامه یابد تا ماهیت این آنومالی (که بزرگ‌ترین آنومالی منطقه است) تعیین شود.

گمانه SH.A.1 در فاصله ۱۲۰۰ متری شمال غرب گمانه ۳۲۱ و در موقعیت شمالی محدوده اکتشافی با شیب ۸۷ درجه و آزیموت ۳۱۵ درجه دستگاه حفاری DBC 21 توسط شرکت کاوش پژوه با اندازه HQ و NQ و BQ انجام گرفت.

گمانه SH.A.2 در ۵۰۰ متری جنوب غرب گمانه SH.A.1 و با شیب ۹۰ درجه و آزیموت ۰ درجه و گمانه SH.A.3 در فاصله ۴۴۰ متری شمال غرب گمانه SH.A.1 و ۶۸۰ متری گمانه SH.A.2 با شیب ۹۰ درجه و آزیموت ۰ درجه حفاری شد.

۴. اهداف و روند انجام پروژه

در مطالعه حاضر اهداف زیر در دستور کار بوده است:

۱. شناسایی عوامل کنترل‌کننده شکل‌گیری آنومالی و مقایسه آنها با دیگر کانسارهای زون بافق و دیگر نقاط دنیا
۲. رده‌بندی و سن‌سنجی کانی‌زایی - سنگ‌شناسی و در صورت امکان تفکیک زمانی فازهای کانی‌زایی - سنگ‌شناسی
۳. ارزیابی پتانسیل عناصر جزئی و خاکی کمیاب و شناسایی انواع کانی‌های مستقل احتمالی برای این عناصر و چگونگی توزیع و پراکندگی آن در سنگ‌های منطقه
۴. بررسی تغییرات ژئوشیمیایی عناصر جزئی و عناصر خاکی کمیاب و سایر عناصر اصلی و فرعی در زون‌های کانه‌دار، دگرسانی/ متاسوماتیسم، سنگ‌های میزبان و نفوذی
۵. مطالعات پترولوژیکی سنگ‌های میزبان و دربرگیرنده آنومالی 21A براساس مطالعه مغزه‌ها، سنگ‌نگاری، ژئوشیمی
۶. تعیین پتانسیل کانه‌زایی احتمالی آهن و دیگر عناصر در این واحد و سازندها و در تمامی نمونه‌ها
۷. ارائه راهکارهای اکتشافی جهت ادامه عملیات اکتشافی در آنومالی 21A

انجام این پروژه براساس اهداف برنامه‌ریزی‌شده در مراحل زیر دنبال شده است:

- مطالعات کتابخانه‌ای، اطلاعات منتشرشده و منتشرنشده طرح، تدوین گزارش مرحله اول طرح شامل جمع‌بندی زمین‌شناسی منطقه، اطلاعات علمی منتشر شده در ژورنال‌ها و مراجع بین‌المللی و داخلی معتبر و تحلیلی از اطلاعات موجود
- لاگ‌برداری علمی دقیق از مغزه‌های حفاری، نمونه‌برداری، آماده سازی، تهیه مقاطع نازک و نازک صیقلی، خردایش نمونه‌ها.
- تهیه ۵۲۵ مقطع نازک و نازک-صیقلی، مطالعات سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری و مباحث سنگ‌شناسی و شناسایی کانه‌ها
- آنالیز ۵۵۰ نمونه به روش ICP-MS در آزمایشگاه زرآزما، ACMELAB کانادا، مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی و دانشگاه فرارا ایتالیا و دانشگاه Tohoku ژاپن. نمونه‌های با عیار آهن بالاتر از حد آشکارسازی دستگاه، به منظور تعیین دقیق مقدار آهن، برای انجام آنالیز XRF به آزمایشگاه‌های مورد نظر ارسال شدند. حدود ۸۰ نمونه افزون بر تعهد شرح خدمات نیز برای آنالیز به روش ICP-MS و ICP-QMS به ژاپن ارسال و در نتایج نهایی طرح از نتایج آن استفاده شد.
- آنالیز ۴۴۲ نمونه EPMA (در قرارداد طرح ۱۰۰ آنالیز در نظر گرفته شده بود) به همراه مطالعات میانبارهای سیال در دانشگاه کلاستال.
- انجام حدود ۲۰۰ آنالیز LA-ICP-MS در دانشگاه ترینیتی کالج دوبلین ایرلند به همراه مطالعات سن‌سنجی آپاتیت.
- مطالعات ایزوتوپی اکسیژن سه‌گانه (Triple oxygen) توسط پروفسور استفان پیترز در دانشگاه گوتینگن آلمان
- مطالعات ایزوتوپ‌های سرب، استرانسیم و نئودیمیم توسط پروفسور Ryuichi Shinjo در دانشگاه اوکیناوا ژاپن

۵. زمین‌شناسی منطقه آنومالی آهن 21A

آنومالی آهن 21A در حوزه ایران مرکزی و در محدوده شهرستان ساغند، در فاصله ۴۵ کیلومتری شرق شهرستان ساغند و حدود ۴۵ کیلومتری هوایی جنوب شهرستان رباط پشت بادام و در فاصله ۳۵ کیلومتری شمال معدن چادرملو واقع شده است. دسترسی به محدوده مورد مطالعه از طریق جاده آسفالته ساغند-طبس و طی مسافتی در حدود ۱۵-۲۰ کیلومتر به سمت شهرستان رباط پشت بادام و سپس راه فرعی خاکی به سمت شرق و طی مسیر حدود ۳۸-۴۰ کیلومتر امکان‌پذیر است.

محدوده مورد نظر در برگه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ زمان آباد و در بخش جنوب‌غربی آن قرار دارد. این آنومالی در ناحیه کویر الله‌آباد و در منطقه کوه موسوم به گرو قرار دارد. ناحیه آنومالی از سنگ‌های رسوبی غیرمغناطیسی با سن مزوزوییک تشکیل شده که چین ناودیسی بزرگی با راستای شبه‌طولی را ایجاد می‌کنند. کانسارهای با سن نئوپروتروزوییک پسین- فانروزوییک پیشین در محدوده این ناحیه برونزد دارند.

در بخش مرکز سطحی آنومالی، سری‌های مزوزوییک (ژوراسیک) با زاویه بین ۱۵° تا ۴۵° به سمت شرق شیب دارد. ترکیب آنها ماسه‌سنگ -شیل است و براساس داده‌های فراهم شده توسط حقی‌پور (۱۹۷۲) ضخامت این سری‌ها که در فاصله ۱۵ تا ۲۰ کیلومتری شمال ناحیه آنومالی اندازه‌گیری شده، حدود ۱۴۰۰ متر است.

۶. مطالعات میدانی و برداشت (لاگینگ) گمانه‌ها

در مطالعات این طرح، صرفنظر از انجام نگاربرداری توسط مشاور قبلی طرح، نگاربرداری مجدد مغزه‌ها و سپس نمونه‌برداری لازم، توسط تیم کارشناسی خبره انجام گرفت و پدیده‌های مشاهداتی برداشت و در ورقه‌های مخصوص از پیش تهیه شده ثبت شد. اطلاعات مذکور شامل هفت لایه زمین‌شناسی هستند: سنگ‌شناسی، دگرسانی، هوازدگی، ساختارها، رگچه‌ها، کانی‌سازی‌ها و منطقه‌بندی مربوط واحدهای سنگی و رخساره‌های دگرسانی – کانی‌سازی. اطلاعات مربوطه در فایل Excel، ابتدا تحلیل شده و با تلفیق برخی از اطلاعات مشابه در هر یک از لایه‌های زمین‌شناسی، در نرم‌افزار اتوکد مقاطع ستونی یا" Columnar Sections" آنها با روش مقیاس ترسیمی (Graphical Scale)، رقومی یا "Digit" شد. پس از لاگینگ کامل و دقیق، نمونه‌برداری از مغزه‌ها برای مطالعات گوناگون از پتروگرافی، مینرالوگرافی، میکروپروب، میکروسکوپ الکترونی، تجزیه ژئوشیمیایی، ایزوتوپی و لیزر و ... انجام و نمونه‌های مربوطه به آزمایشگاه زمین شناسی دانشگاه تهران ارسال گردید.

مطالعه لاگینگ صورت گرفته، نتایج زیر را به دنبال داشته است:

در گمانه SHA1، حفاری در متراژهای پایین کمتر از ۵۰ متر در رسوبات آبرفتی و پس از آن از تا ۱۵۰۰ متر شامل سنگ‌های آواری (ماسه سنگ، سیلتستون، شیل و کنگلومرا) سازند نایبند به سن تریاس پسین تا ژوراسیک پیشین، اسلیت با میان‌لایه‌هایی از شیل و اسلیت زغالی است. از متراژ حدود ۱۵۰۰ متری اولین رگه مگنتیت با ضخامت ۴.۴ متر مشخص گردیده که به همراه آن سنگ‌های شیستی دارای اکتینولیت نیز مشاهده می‌شود. از حدود ۱۵۰۰ تا ۱۷۰۰ متر سنگ‌های به‌دست آمده از نوع مونزوگرانیت به‌شدت متاسوماتیسم شده با بافت پورفیروکلاستیک همراه با دگرسانی پروپیلیتیک است و تا پایان عمق حفاری، تناوبی از سنگ آهن (عیاربالا، متوسط و پایین) و سنگ‌های متاسوماتیت و توده های نفوذی قابل مشاهده است. متراژ سنگ آهن در گمانه اول برابر ۱۹۲.۴۰ متر بوده که شامل ۷۹.۲۵ متر مگنتیت عیار بالا، ۴۶.۴۰ متر مگنتیت عیار متوسط و ۶۶.۷۵ متر مگنتیت عیار پایین است.

در گمانه SHA2، حفاری از متراژ ۰ تا ۲.۵۰ متری در رسوبات آبرفتی و پس از آن تا عمق ۱۳۱۷.۶ متر شامل سنگ‌های آواری (ماسه سنگ، سیلتستون، شیل و کنگلومرا) سازند نایبند به سن تریاس پسین تا ژوراسیک پسین، سپس همان واحدها با دگرگونی ضعیف و میان‌لایه‌هایی از شیل‌ها و اسلیت‌های زغالی است که از عمق ۱۳۱۷.۶۰ تا ۱۵۶۴.۱۰ متر با مونزوگرانیت‌های به‌شدت متاسوماتیسم شده با دگرسانی‌های پروپیلیتی دنبال می‌شود. از متراژ ۱۵۶۴.۱۰ تا ۱۵۷۲.۵۰، اولین رگه مگنتیت با ضخامت ۸.۴ متر با عیار پایین تا بالا مشخص گردیده که به‌همراه آن، سنگ‌های متاسوماتیت دارای کانی اکتینولیت و کلریت نیز مشاهده می‌شود. رگچه‌های کلسیت و کوارتز به‌صورت پراکنده در این مگنتیت‌ها مشاهده می‌شود. از عمق ۱۵۷۲.۵۰ متری تا پایان گمانه، شاهد تناوبی از نفوذی‌های متاسوماتیت شده و رگه و رگچه‌های مگنتیت هستیم. مگنتیت مشاهده شده هیچ‌گاه ضخامت بالایی نداشته و در بعضی قسمت‌ها به‌صورت رگه‌های با ضخامت کمتر از ۵ متر و در بقیه قسمت‌های گمانه به‌صورت رگچه‌های پراکنده در سنگ های متاسوماتیت مشاهده می‌شود. از نظر عیاری هم شاهد تناوبی از مگنتیت عیار بالا، متوسط و

عیار پایین هستیم. مجموع مقدار سنگ آهن حفاری شده در این گمانه برابر ۵۶.۶۰ متر بوده که شامل ۸.۲۰ متر مگنتیت عیار بالا، ۱۱.۵۰ متر مگنتیت عیار متوسط و ۳۶.۹۰ متر مگنتیت عیار پایین است.

در گمانه SHA3، حفاری تا متراژ ۲.۵۰ متری در آبرفت و پس از آن تا عمق ۱۳۷۹.۵۰ متری شامل سنگ‌های آواری (ماسه سنگ، سیلتستون و شیل) سازند نایبند و سپس اسلیت و میان‌لایه‌های شیل‌ها و اسلیت‌های زغالی در آن مشاهده می‌شود. از عمق ۱۳۷۹.۵۰ تا متراژ پایانی یعنی عمق ۱۹۵۵.۵۰ متری لیتولوژی از نوع نفوذی است که در بعضی قسمت‌ها دگرسانی ضعیف تا متوسط کلریتی و سیلیسی در آن دیده می‌شود. این گمانه، بجز دانه‌های پراکنده مگنتیت، فاقد کانه‌زایی است.

۷. پتروگرافی

بر اساس مطالعه بیش از ۶۰۰ مقطع نازک و نازک – صیقلی تهیه شده از مغزه‌ها، سکانس آذرین - دگرگونی، عمدتا با ترکیب کوارتزمونزوگرانیت و سنگ‌های مرتبط با آن و انواع سنگ‌های حاصل از میلونیتی شدن آن، یعنی میکاشیست (و گونه‌های دیگر آن)، تا گنایس (به مقدار اندک) است تا انتهای گمانه‌ها ادامه می‌یابد.

۸. شیمی کانی

به منظور تعیین نوع کانی و کانه‌ها، از مطالعات شیمی کانی‌های اصلی سازنده آنومالی آهن 21A بهره گرفته شده است. بدین منظور پس از بررسی‌های پتروگرافی، از نمونه‌های سنگی مناسب مقطع نازک- صیقلی تهیه و تعداد ۲۴۵ نمونه پروب از کانسنگ مگنتیتی آنومالی آهن 21A و تعداد ۶۵ نمونه پروب از آپاتیت آنومالی آهن 21A در آزمایشگاه دانشگاه کلاستال آلمان و دانشگاه ترینیتی کالج دوبلین ایرلند، به‌منظور دستیابی به نتایج مورد نظر اندازه‌گیری و مورد بررسی واقع شده‌اند.

در مطالعات پژوهشی، با استفاده از میزان تغییرات وانادیم در برابر تیتانیم، می‌توان مگنتیت‌های کانسارهای مگنتیت- آپاتیت و کانسارهای آهن تیتان‌دار را از کانسارهای آهن رسوبی (سازندهای آهن رسوبی) جدا کرد. در این تقسیم‌بندی، مرز جدا کنندهٔ این تیپ کانسارها از یکدیگر، میزان وانادیم حدود ۱۰۰ ppm است (مقادیر بیش از ۱۰۰ وانادیم در کانسارهای مگنتیت- آپاتیت و مگنتیت تیتان‌دار و کمتر از آن در کانسارهای نواری رسوبی). تمامی نمونه‌های منطقه مور مطالعه در محدودهٔ کانسارهای مگنتیت- آپاتیت قرار می‌گیرند.

برای جداسازی انواع کانسارهای آهن از یکدیگر، از عنصر آهن که اصلی‌ترین عنصر سازندهٔ مگنتیت است، نسبت به عناصر مختلف به‌ویژه Fe/V, Fe/Ti, V/Ti و Ni/Ti نیز استفاده می‌شود. بر اساس نسبت Fe/Ti در برابر Fe/V ، و هم‌چنین براساس تغییرات میزان V/Ti در برابر Ni/Ti ، نمونه‌های مورد مطالعه، در محدوده کانسارهای مگنتیت- آپاتیت قرار می‌گیرند.

میانگین مقادیر Y و Sr در آپاتیت‌های آنومالی آهن 21A به‌ترتیب ۴۷۱۲۴ ppm و ۴۸۹ ppm اندازه گیری شده است. بر اساس نمودارهای Sr در برابر Y با تفکیک واضح از کربناتیت‌ها، غالباً در محدوده سنگ‌های مافیک و کانسارهای آهن تیپ

کایرونا واقع شده‌اند. آپاتیت در کربناتیت‌ها با داشتن مقدار Sr بالا (۲۵۰۰ ppm <) و Y کم (۴۰۰ ppm >) (Belousova et al., 2002) از آپاتیت‌های کانسارهای آهن تیپ کایرونا متمایز می شود.

در منطقه مورد مطالعه، آپاتیت‌ها غنی از فلوئور و فقیر از کلر و مشابه سایر آپاتیت‌های گزارش شده از ناحیه بافق هستند. واقع شدن نمونه‌های مورد مطالعه در کانسار آنومالی آهن 21A (مانند سایر کانسارهای ناحیه بافق)، در محدوده سنگ‌های مافیک و کانسارهای آهن تیپ کایرونا، به نقش احتمالی توده‌های نفوذی مافیک در زایش کانسارهای مگنتیت-آپاتیت در ناحیه بافق اشاره دارد.

۹. ژئوشیمی و پتروژنز، مطالعات ایزوتوپی و سن‌سنجی

برپایه نمودارهای رده‌بندی ژئوشیمیایی سیلیس در برابر مجموع قلیایی‌ها (Na2O+K2O)، نمونه‌های پلوتونیک آنومالی ۲۱ اغلب در محدوده مونزونیت قرار گرفته‌اند و این تقسیم‌بندی ژئوشیمیایی تطابق خوبی با مطالعات سنگ‌نگاری دارند. میزان متغیر K_2O در نمونه‌های منطقه با قرارگیری آنها در محدوده کالک-آلکالن تا کالک-آلکالن پتاسیم بالا در نمودار SiO_2 در برابر K_2O همراه است. برپایه شاخص اشباع آلومینیم (ASI)، مقادیر A/CNK ($Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$) نمونه‌های پلوتونیک مورد مطالعه منطقه در محدوده متاآلومینوس تا اندکی انحراف به سمت پرآلومینوس واقع شده‌اند که این انحراف به‌موجب افزایش نسبی میزان عناصر قلیایی (Na_2O+K_2O) به‌دنبال تفریق ماگما، تفریق آمفیبول و یا ناهمگنی آب در پروتولیت گوشته است.

ویژگی‌های سنگ‌نگاری همچون حضور کانی‌های مافیک موجود در سنگ‌های منطقه (مانند آمفیبول و تا حدی نیز کلینوپیروکسن) و نیز مشخصه‌های ژئوشیمیایی این نمونه‌ها همچون $Na_2O>K_2O$ و A/CNK <1 تاییدی بر ماهیت تیپ I سنگ‌های پلوتونیک آنومالی ۲۱ است. بر روی نمودار Yb در برابر Th/Ta، سنگ‌های پلوتونیک منطقه مورد مطالعه مشخصه‌های حاشیه فعال قاره‌ای کمان ماگمایی را از خود نشان می‌دهند. ماهیت حاشیه فعال قاره‌ای بودن نمونه‌های منطقه مورد مطالعه با قرارگیری آنها در محدوده کمان قاره‌ای در نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb نیز قابل اثبات است.

نمودارهای بهنجار شده عناصر جزئی و عناصر خاکی کمیاب به گوشته اولیه و کندریت حاکی از غنی‌شدگی متوسطی از LREE، Rb، Th، U، K و تهی‌شدگی از HFSE، Nb، Ta، Ti و Sr هستند که چنین ویژگی‌های ژئوشیمیایی دلالت بر یک محیط فرورانش دارند که ماگما در حاشیه فعال قاره‌ای فوران و جایگیری کرده است. به‌علاوه، الگوهای REE مشابه در نمونه‌های پلوتونیک آنومالی ۲۱ بهنجار شده به کندریت (غنی‌شدگی از عناصر خاکی کمیاب سبک (LREE) نسبت به عناصر خاکی کمیاب سنگین (HREE)) را می‌توان به سنگ‌های ماگمایی مشتق از گوشته سنگ‌کره‌ای که قبلا توسط فرایندهای فرورانش تغییر کرده‌اند، نسبت داد. سنگ‌های پلوتونیک آنومالی ۲۱ با مشخصه‌های ژئوشیمیایی همچون(La/Yb)N =۲/۹-۸/۵، ۲-/۷ (Gd/Yb)N =۰/۹ و نیز بی‌هنجاری منفی مشخص Eu همراه می‌باشند. روند پراکنده عناصر لیتوفیل را می‌توان تا حدی به دگرسانی گرمابی موجود در منطقه نسبت داد.

بر اساس نتایج حاصل از داده‌های ایزوتوپی استرونسیم (Sr) و نئودیمیم (Nd) نمونه‌های پلوتونیک آنومالی ۲۱ و مقادیر Rb، Sr، Sm و Nd که با اهداف مطالعات ایزوتوپی اندازه گیری شدند، سن‌های به‌دست آمده به روش اورانیم-سرب کانی زیرکن در سنگ‌های نفوذی منطقه با حدود ۴۸۰ تا ۵۰۰ میلیون سال محاسبه شده است. نسبت $^{87}Rb/^{86}Sr$ نمونه‌های مورد مطالعه منطقه در گستره تغییرات ۰/۶۶ تا ۴/۱۶ و مقادیر اولیه $^{87}Sr/^{86}Sr$ در یک دامنه تغییرات گسترده ۰/۷۰۶۵ تا ۰/۷۱۸۳ قرار گرفته‌اند. به علاوه، تغییرات در میزان اولیه $^{143}Nd/^{144}Nd$ محدود می‌باشد که معادل ۱/۸- ۳/۳- =εNd(i) است. سن مدل گوشته تهی‌شده (TDM) سنگ‌های پلوتونیک آنومالی ۲۱ در یک بازه زمانی ۱/۳- Ga ۰/۹ محاسبه شده که در تطابق کامل با ماگمای منشا گرفته شده از یک پوسته کادومین ایران است.

بر اساس نتایج حاصل از داده‌های ایزوتوپی سرب (Pb) نمونه‌های پلوتونیک آنومالی ۲۱ این سنگ‌ها ترکیب ایزوتوپی محدودی از Pb هستند که شامل $^{206}Pb/^{204}Pb$ =۱۸/۸۷-۲۰/۳۲، $^{207}Pb/^{204}Pb$ =۱۵/۷۲-۱۵/۸۴ و ۴۲/۳۲- $^{208}Pb/^{204}Pb$=۴۰/۷۴ است. مقادیر ایزوتوپی سنگ‌های پلوتونیک آنومالی ۲۱ شباهت‌هایی با مقادیر گزارش شده از دیگر نقاط ایران مرکزی مانند چادرملو و زرند (جلال آباد) از خود نشان می‌دهند به‌طوری‌که تمامی نمونه‌های ایران مرکزی در محدوده رسوبات دریایی امروزی و پوسته قاره‌ای بالایی قرار گرفته که این امر دلالت بر منشا سرب از پوسته بالایی دارد.

به منظور سن سنجی U-Pb و نیز تعیین نسبت‌های ایزوتوپی Lu-Hf نمونه‌های مورد مطالعه، از هر گمانه اکتشافی ۴ نمونه و در کل ۱۲ نمونه با کمترین هوازدگی انتخاب شدند. زیرکن‌های جداشده به‌منظور تعیین سن با استفاده از دستگاه CAMECA IMS-1280-HR secondary ion mass spectrometer (SIMS) و نیز به منظور تعیین نسبت‌های ایزوتوپی هافنیم با استفاده از دستگاه Neptune Plus laser-ablation–multicollector–inductively coupled plasma–mass spectrometer (LA-MC-ICP-MS) در دانشگاه گوانژو مورد آنالیز قرار گرفتند. نقاط آنالیز شده عمدتا در محدوده سن $^{206}Pb/^{238}U$ دوره کامبرین واقع شده‌اند. بر این اساس در گمانه SH.A.1، نمونه An21-01 واقع در عمق ۱۵۱۱ متری سن ۵۱۲±۹ Ma (n=۱۹، MSWD=۵/۴)، نمونه An21-02 واقع در عمق ۱۵۶۲ متری سن ۴۷۸±۹ Ma (n=۱۸، MSWD=۲/۵)، نمونه An21-15 واقع در عمق ۱۶۵۰ متری سن ۵۰۲±۴ Ma (n=۲۰، MSWD=۱/۱) و نمونه An21-07 واقع در عمق ۱۷۵۴ متری سن ۵۰۴±۱۹ Ma (n=۱۸، MSWD=۰/۳) نشان می‌دهند.

در گمانه SH.A.2، نمونه An21-17 واقع در عمق ۱۲۹۷ متری سن ۴۸۷±۴ Ma (n=۱۹، MSWD=۱/۱)، نمونه An21-14 در عمق ۱۳۵۸ متری سن ۵۰۰±۴ Ma (n=۲۰، MSWD=۱/۰)، نمونه An21-08 واقع در عمق ۱۵۸۰ متری سن ۴۸۹±۶ Ma (n=۱۹، MSWD=۲/۴) و نمونه An21-16 واقع در عمق ۱۳۶۷ متری سن ۴۸۸±۸ Ma (n=۱۸، MSWD=۲/۸) را از خود نشان می‌هند.

در گمانه SH.A.3، نمونه An21-18 واقع در عمق ۱۵۰۶ متری سن ۴۷۴±۱۰ Ma (n=۱۸، MSWD=۶/۲)، نمونه An21-11 واقع در عمق ۱۷۴۷ متری سن ۵۰۴±۶ Ma (n=۱۹، MSWD=۱/۷)، نمونه An21-10 واقع در عمق ۱۷۷۲ متری

سن ۵۰۸±۹ Ma (n=۱۶، MSWD=۳/۶) و نمونه An21-12 واقع در عمق ۱۹۴۵ متری سن ۵۰۱±۵ Ma (n=۱۷، MSWD=۱/۴) را از خود نشان می‌دهند.

در روش ایزوتوپی Lu-Hf زیرکن‌های آنالیزشده به روش U-Pb برای تعیین نسبت‌های ایزوتوپی $^{176}Lu/^{177}Hf$ و $^{176}Hf/^{177}Hf$ مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر ایزوتوپ اولیه هافنیم براساس گستره سنی به دست آمده از نمونه‌های زیرکن محاسبه شده است. مقادیر $^{176}Hf/^{177}Hf$ زیرکن‌های مورد مطالعه در گستره بین ۰/۸۱۴۳ تا ۰/۲۸۲۸۱ معادل با εHf(t) ۴/۷- تا ۱۱/۶+ قرار گرفته‌اند. با توجه به مقادیر مثبت هافنیم به‌دست آمده در نمونه‌های مورد مطالعه منطقه می‌توان نتیجه گرفت که نقش گوشته را در پتروژنز سنگ‌های نفوذی- نیمه نفوذی آنومالی ۲۱ بارزتر بوده است. نسبت‌های $^{176}Hf/^{177}Hf$ زیرکن‌های مورد مطالعه سن‌های TDMC ۰/۷ تا ۱/۷ میلیارد سال را از خود نشان می‌دهند که این امر حاکی از مشارکت بخشی پوسته قاره‌ای پیش از نئوپروتروزوییک در تشکیل پوسته کامبرین زیرین ایران مرکزی است.

مقادیر $^{176}Hf/^{177}Hf$ زیرکن‌های مورد مطالعه در گستره بین ۰/۸۱۴۳ تا ۰/۲۸۲۸۱ معادل با εHf(t) ۴/۷- تا ۱۱/۶+ قرار دارند. تلفیق داده‌های سن‌سنجی و ایزوتوپ‌های هافنیم نمونه‌های نفوذی- نیمه‌نفوذی آنومالی ۲۱ دلالت بر جایگیری آنها در مراحل نهایی ماگماتیسم کادومین در ایران مرکزی دارد که این ماگماتیسم عمدتا از ترکیبات گوشته‌ای تشکیل شده است. از سوی دیگر، تلفیق داده‌های سن‌سنجی زیرکن و آپاتیت‌های نمونه‌های ولکانو-نفوذی- نیمه نفوذی ایران مرکزی حاکی از همزمانی سن جایگیری سنگ‌های میزبان با کانی‌زایی مگنتیت-آپاتیت (۴۷۴ تا ۵۲۵ میلیون سال) ایران مرکزی بوده است.

برای پی بردن به نوع و منشا شکل‌گیری کانسار آنومالی 21A به‌عنوان یکی از کانسارهای مگنتیت-آپاتیت ایران مرکزی، ترکیب ایزوتوپ‌های سه‌گانه اکسیژن از نمونه‌های مگنتیتی مورد مطالعه قرار گرفتند. مقادیر $\delta^{18}O$ نمونه مگنتیت ایران مرکزی بین ۲/۰۶‰ و ۲/۹۱‰ واقعند و شباهت زیادی با نمونه‌های گزارش شده از نهشته‌های این زون نشان می‌دهند. $\Delta'^{17}O0.528$ مربوطه مگنتیت در گستره بین ۱۱۷ppm- تا ۱۰۹- قرار می‌گیرند. مگنتیت موجود در کانسنگ‌های منطقه مقدار $\delta^{18}O$ پایین‌تر و نیز مقدار $\Delta'^{17}O0.528$ بالاتری ($\delta18O = -0.68‰$; $\Delta'^{17}O0.528 = -19$ ppm) نسبت به مگنتیت‌های نهشته‌های آهن-اکسید-آپاتیت یزد و سیرجان دارند. مقادیر $\Delta'^{17}O$ 0.528 نمونه‌های مورد مطالعه منطقه گستره محدودی دارند (۱۱۷ppm- تا ۱۰۹) که بسیار فراتر از دامنه سنگ‌های آذرین و کانی‌هاست. از سوی دیگر، مقادیر $\delta^{18}O$ این نمونه‌ها مشابه با مگنتیت در حال تعادل با ماگما و آبهای ماگمایی هستند. مقادیر بسیار پایین $\Delta'^{17}O0.528$ این نمونه‌ها دلالت بر این دارد که این مگنتیت‌ها نمی‌توانند در تعادل با ماگما یا با آبهای ماگمایی اولیه در زمان تشکیل باشند. از سوی دیگر، این نمونه‌ها نیز نمی‌توانند در تعادل با سیالات ناشی از آب دریا یا از آبهای جوی باشند، زیرا مگنتیت در تعادل با چنین سیالاتی مقادیر بالای $\Delta'^{17}O0.528$ دارد.

این احتمال وجود دارد که ترکیب عضو نهایی مگنتیت که در داده‌های با ۱۲۰ppm- ~ $\Delta'17O0.528$ ثبت شده است از سیالاتی به وجود آمده‌اند که با سنگ‌های تبخیری کامبرین آغازین تبادلات ایزوتوپی اکسیژن داشته و مرتبط با نهشته‌های آهن-اکسید-آپاتیت (IOA) هستند. مقدار $\Delta'17O0.528$ این سنگ‌ها شبیه به سنگ‌های تبخیری‌های سازند هرمز در جنوب ایران است که از نظر چینه شناسی معادل با افق‌های تبخیری مناطق یزد و سیرجان می‌باشند.

مگنتیت‌های نهشته‌های آهن-اکسید-آپاتیت مناطق مورد مطالعه و نیز سایر مناطق ایران مرکزی (یزد و سیرجان) از سیالات ماگمایی که تبادلات ایزوتوپی اکسیژن با سنگ‌های تبخیری (و مقداری ناچیز کربنات‌هایی با نسبت‌های متغیر آب/سنگ) داشته‌اند، تشکیل شده‌اند. داده‌های ایزوتوپ آهن موجود برای مگنتیت‌های موجود در نهشته‌های یزد و سیرجان (‰ ۰/۵- ‰ ۰/۲= $\delta 56Fe$) حاکی از یک منشا ماگمایی دما بالا (بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) است. این داده‌ها هم‌چنین منشا گرمابی دما پایین را برای تشکیل این نهشته‌ها منتفی می‌داند.

مگنتیت‌های منطقه احتمالا از سیالاتی با دمای ماگمایی تشکیل شده‌اند. اما کانی‌های سولفیدی و نیز آپاتیت‌های موجود در نهشته‌های آهن مادامی‌که دمای سیالات ماگمایی به پایین‌تر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته، تشکیل شده‌اند. این درحالی است که ایزوتوپ‌های اکسیژن سه‌گانه مگنتیت به دست آمده از نهشته‌های یزد عمدتا شواهد فعل و انفعال بین سیالات ماگمایی و سنگ‌های تبخیری را از خود نشان می‌دهند.

افزون بر نمونه‌های ارسال شده به آلمان، به‌منظور شناخت ماهیت سیالات کانه‌ساز و همچنین بررسی احتمالی آمیختگی آبهای جوی با آبهای ماگمایی، ۱۷ آنالیز ایزوتوپی اکسیژن بر روی کانه مگنتیت در آزمایشگاه ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه اراک صورت گرفت. نتایج حاصل از این آنالیز بر اساس استاندارد میانگین آب اقیانوس محاسبه شده و مقدار $\delta^{18}O$ مگنتیت‌ها بین ۵.۷۷+ تا ۱۲.۵۰+ ‰ است.

به‌منظور آگاهی از منشأ گوگرد و منبع سیالات مولد کانی سولفیدی دو نمونه پیریت به‌عنوان سولفید اصلی در کانسار برای آنالیز ایزوتوپ پایدار گوگرد در نظر گرفته شد. با توجه به کم بودن مقدار پیریت در کانسار و ریز بودن ذرات آن که قابلیت جدایش ندارند، به تعداد دو نمونه بسنده شد.

میزان $\delta^{34}S(CDT)$ اندازه‌گیری شده در پیریت، گستره وسیعی از مقادیر ۷.۸۹ تا ۱۶.۰۶ را نشان می‌دهند که می‌تواند حاکی از تامین گوگرد از یک منشا ماگمایی یا یک منشا غنی از ^{34}S باشد..

۱۰. جمع‌بندی و پیشنهادها

مدل تشکیل و جایگاه ژئودینامیکی آن

واحدهای نفوذی- نیمه‌نفوذی آنومالی آهن 21A تغییرات محدودی در محدوده مونزونیت و اساسا ماهیت کالک-آلکالن تا کالک-آلکالن پتاسیم بالا دارند. نمودارهای بهنجارشده به گوشته اولیه و کندریت حاکی از غنی‌شدگی مشخصی از LILE و تا حد کمتر LREE به‌ترتیب نسبت به HFSE و HREE است و چنین ویژگی‌های ژئوشیمیایی را می‌توان به سنگ‌های ماگمایی مشتق از گوشته سنگ‌کره‌ای که قبلا توسط فرایندهای فرورانش تغییر کرده‌اند، نسبت داد. غنی‌شدگی از LILE و LREE نسبت به HFSE و LREE، میانگین نسبت Nb/Ta و Nb/La که دلالت بر ویژگی گوشته‌ای سنگ‌های منطقه دارند، و نسبت Y/Nb که دلالت بر نقش ضمنی پوسته طی پتروژنز سنگ‌های آنومالی ۲۱ دارد، و دارا بودن نسبت Nb/U در گستره ۱۶ تا ۳۲ مشارکت درجات مختلف پوسته در پتروژنز سنگ‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهند. همچنین مقادیر ایزوتوپی ۰/۷۰۶ – ۰/۷۱۸

$(^{87}Sr/^{86}Sr)_{i=}$ و $\varepsilon Nd_{(t)}=$ -۳/۳-۱/۸ سنگ‌های پلوتونیک آنومالی ۲۱ دلالت بر نقش رسوبات پلاژیک فرورونده و یا درجات مختلف آلایش با ترکیبات پوسته بالایی و یا اختلال و تحرک استرونسیم طی فرایند دگرسانی گرمابی از راه واکنش با آبهای جوی دارد. مقادیر منفی و مثبت ایزوتوپی نئودیمیم نمونه‌های پلوتونیک آنومالی ۲۱ حاکی از نقش گوشته غنی شده EMI و EMII و یا فعل و انفعالات گوشته-پوسته در تشکیل سنگ‌های این منطقه دارد.

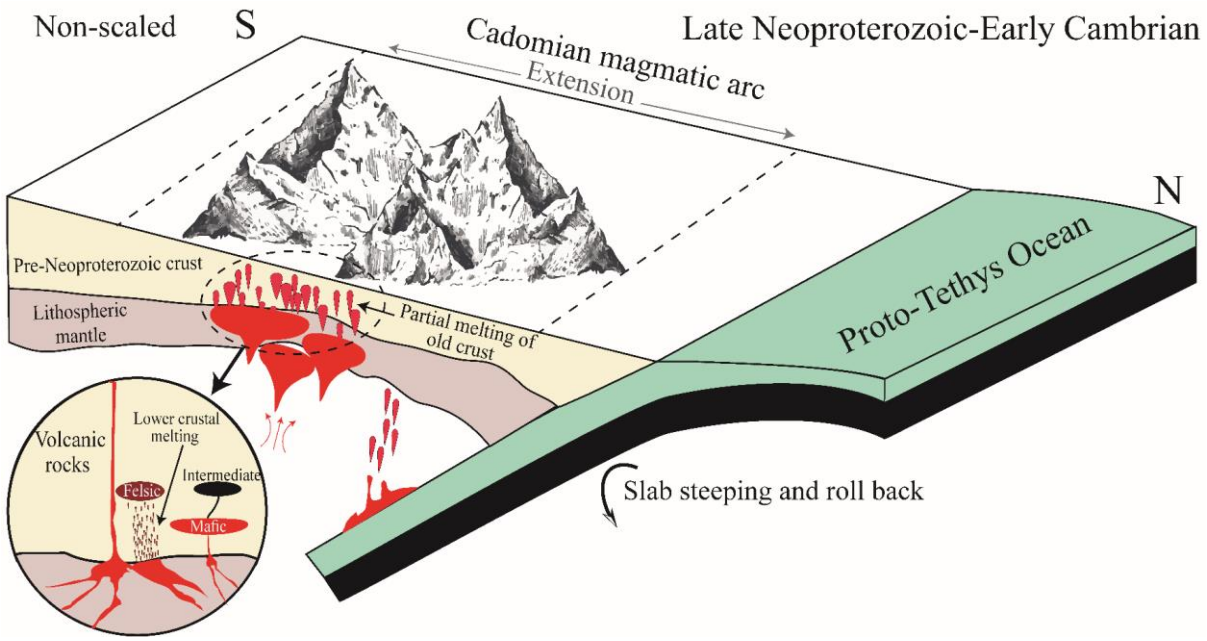
ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های پلوتونیک آنومالی ۲۱ همچون Sr/Y= ۱/۱-۴۴/۲ و نیز La/Yb= ۴/۱-۱۵/۷ در تضاد با سنگ‌های آداکیتی بوده و حاکی از عدم دخالت مذاب مشتق شده از تختال فرورونده در تشکیل سنگ‌های منطقه است.

سنگ‌های ماگمایی اواخر نئوپروتروزوییک تا اوایل پالئوزوییک کمتر از ۵ درصد فلات ایران را در برمی‌گیرند که عمدتا در مناطق ایران مرکزی، شمال‌غرب، شمال‌شرق، و مناطقی از زون سنندج-سیرجان رخنمون دارند. صرف‌نظر از ترکیب ژئوشیمیایی آن‌ها، ساختار کادومین در ایران در یک گستره زمانی محدود ۴۷۰ تا ۶۲۰ میلیون سال قرار گرفته است که در تطابق زمانی با پوسته کادومین رخنمون یافته در جنوب‌شرق آناتولی (۵۷۲ تا ۵۵۹ میلیون سال) می‌باشد.

دو فرضیه احتمالی به عنوان سازوکار اصلی ژئودینامیک در زمان اواخر نئوپروتروزوییک تا اوایل پالئوزوییک مطرح شده است: ۱) رژیم تکتونیکی پشت‌کمان قبل از برخورد و ۲) رژیم تکتونیکی فشارشی در کافت‌های قاره‌ای پس از برخورد. مطالعه حال حاضر بر روی سنگ‌های نفوذی- نیمه نفوذی آنومالی آهن 21A فرض می‌کند که یک ماگماتیسم گسترده در ۶۲۰ میلیون سال پیش در بخش‌هایی از ایران مرکزی، جنوب شرق و شمال‌غرب ایران آغاز و در ۵۵۰ میلیون سال پیش به اوج خود رسید که در یک رژیم تکتونیکی کششی به دنبال برگشت صفحه اقیانوسی فرورونده (slab-rollback) و یا جداشدگی آن (slab-breakoff) رخ داد. براین اساس، نمونه‌های نفوذی- نیمه نفوذی آنومالی 21A با گستره سنی ۴۷۴ تا ۵۱۲ میلیون سال دلالت بر مراحل نهایی ماگماتیسم گسترده در ایران مرکزی دارد. این در حالی است که تلفیق داده‌های سن‌سنجی زیرکن و آپاتیت‌های نمونه‌های ولکانو-نفوذی- نیمه‌نفوذی ایران مرکزی حاکی از همزمانی سن جایگیری سنگ‌های میزبان ولکانو-نفوذی- نیمه‌نفوذی با کانی‌زایی مگنتیت-آپاتیت (۴۷۴ تا ۵۲۵ میلیون سال) در برخی از مناطق ایران مرکزی بوده است.

داده‌های به‌دست آمده از این تحقیق با اجماع نظر بر روی تحول پی‌سنگ کادومین در ایران مرکزی همخوان است که نمونه‌های مورد مطالعه، آنومالی‌های Nb-Ta و ترکیبات ایزوتوپی Sr-Nd-Pb نزدیک به حوضه‌های کادومین زرند و جلال‌آباد را از خود نشان می‌دهند. نمونه‌های کادومین احتمالاً بیانگر مذاب مشتق شده از یک گوشته استنوسفری است که با مذاب حاصل از گوشته لیتوسفری متاسوماتیزه شده توسط سیالات صفحه فرورونده، آمیخته شده است. این فرضیه ژئودینامیکی با داده‌های ایزوتوپی به‌دست آمده از منطقه مطابقت دارد. حضور کانی‌های آبدار در سنگ‌ها (مانند آمفیبول) همراه با غنی‌شدگی متوسط عناصر لیتوفیل نیز تایید بر این امر است که ماگمای OIB-like منطقه به‌طور بخشی از ذوب بخشی یک گوشته استنوسفری-لیتوسفر زیرقاره‌ای متاسوماتیزه شده منشا گرفته‌اند. بنابراین، ذوب گوشته لیتوسفری در اثر گرمای ناشی از پلوم‌های گوشته‌ای منجر به تشکیل یک مذاب OIB-like در ایران مرکزی شده است. بالاآمدگی پلوم گوشته استنوسفری و قرارگیری آن در گوشته

لیتوسفری، احتمالاً باعث برهم زدن ژئوترم‌ها شده و در نتیجه شرایط را برای ذوب لیتوسفر فراهم کرده است (شکل ۱). این فرایندها توأم با تزریق ماگما به سطوح پوسته منجر به ناهمگنی ناحیه گوشته و مختل کردن نسبت‌های ایزوتوپی و به دنبال آن افزایش نسبت‌های L-MREE/HREE در الگوهای بهنجار شده نسبت به کندریت شده است.



شکل ۱ تکامل تکتونیکی نئوپروتروزوییک پسین- اوایل کامبرین (حدود ۶۰۰-۵۰۰ میلیون سال) از ایران مرکزی (و شمال گندوانا)

سن‌سنجی و تفکیک زمانی فازهای کانه‌زایی- سنگ‌شناسی

سن‌سنجی U-Pb بر روی توده‌های مونزونیتی برداشت شده از سه گمانه اکتشافی SH.A.1 با عمق ۱۹۰۰/۱ متر، گمانه SH.A.2 با عمق ۱۹۰۷/۵ متر و گمانه SH.A.3 با عمق ۱۹۹۵/۵ متر به‌ترتیب نشانگر دامنه زمانی ۴۷۸ تا ۵۱۲ میلیون سال، ۴۷۸ تا ۵۰۰ میلیون سال و ۴۷۴ تا ۵۰۸ میلیون سال برای این سنگ‌های نفوذی این سه گمانه است. تحقیقات کنونی به‌خوبی نشان می‌دهد که سن‌سنجی‌های به‌عمل آمده از کمربند متالوژنیک آهن بافق (BIMB) هم‌زمان با یا بعد از جایگیری گرانیت‌های زریگان و نریگان (۵۲۵ تا ۵۴۵ میلیون سال) است. زمان تشکیل این حوضه متالوژنیک براساس سن سنجی U-Th-Pb کانی مونازیت در گستره زمانی ۲۱± ۵۱۵ Ma تا ۲۱± ۵۲۹ Ma، بر اساس سن سنجی U-Pb بر روی مونازیت در گستره زمانی ۵۲۷ تا ۵۳۹ میلیون سال و ۸± ۵۱۰ Ma است. ارتباط زمانی و مکانی نزدیک کانسارهای آپاتیت -اکسید آهن با سنگ‌های آتشفشانی فلسیک کامبرین زیرین پیشنهاد می‌کند که کانه‌زایی و ماگماتیسم کامبرین پیشین هم‌زمان با یکدیگر بوده اند. سن ۱۱± ۲۱۵ Ma آپاتیت‌های آنومالی آهن 21A (۳۰ کیلومتری شمال چادرملو) نشانگر اپیزود کششی در بلوک پشت بادام معادل است.

پتانسیل کانه‌زایی احتمالی آهن و دیگر عناصر در آنومالی ۲۱

نتایج مطالعه حاضر صرفا بر مبنای حفر سه گمانه اکتشافی عمیق بوده است و با در نظر گرفتن آنکه عملا در دو گمانه کانه‌زایی به خوبی در مغزه‌ها مشاهده نشده، طبعا اعلام ذخیره یا پتانسیل احتمالی کانه‌زایی آهن و دیگر عناصر از صحت و دقت مناسب برخوردار نیست. با این حال، آنچه در مشاهدات و مطالعات کنونی مشخص است آنکه در آنومالی 21A کانه‌زایی مشخص و قابل بررسی صرفا کانسنگ آهن است و دیگر عناصر فلزی و غیرفلزی اهمیت خاصی ندارند. عناصر خاکی کمیاب نیز صرفا در زون‌های آپاتیت‌دار تا حدودی شناسایی شده‌اند که این مهم نیز با در نظر گرفتن حضور کم‌رنگ آپاتیت در گمانه‌ها اهمیتی از دید پتانسیل احتمالی ندارد.

معرفی عوامل کنترل کننده شکل‌گیری آنومالی

با توجه به مطالعات صورت پذیرفته شده در آنومالی آهن 21A در خصوص معرفی عوامل کنترل کننده شکل‌گیری آنومالی می‌توان به نتایج زیر اشاره داشت:

ژئومتری کانی‌زایی: هر چند قضاوت بر مبنای ۳ گمانه، چندان منطقی و علمی نیست؛ ولی به‌نظر می‌رسد که به‌صورت عدسی‌ها و رگه‌های توده‌ای و زون‌های کانسنگی نامنظم در حاشیه یک توده نیمه‌نفوذی تشکیل شده باشد. گمانه شماره ۳ که در درون توده نفوذی حفاری شده، فاقد کانه‌زایی است و به سمت اطراف توده (گمانه ۱)، لایه ضخیمی از سنگ آهن به ضخامت نزدیک به ۲۰۰ متر به طور پیوسته تشکیل شده و در زون‌های بالا و زیر آن، رگه‌های نسبتا ضخیم تا نازک کانه‌زایی مگنتیت به فراوانی رخ داده است.

بافت و ساخت: اغلب سنگ‌های میزبان کانه‌زایی، بافت گرانوبلاستیک دارند و مگنتیت ساخت و بافتی از توده‌ای تا افشان و رگه - رگچه‌ای نشان می‌دهد.

کانی‌شناسی کانسنگ: مگنتیت ± هماتیت (مارتیت) ± پیریت ± آپاتیت ± کالکوپیریت

دگرسانی: اپیدوت ± اکتینولیت ± کلریت ± آپاتیت ± فلدسپار پتاسیم مرحله تأخیری، محصولات دگرسانی هستند.

کنترل‌کننده‌های کانه‌زایی: مسلما نفوذ توده آذرین و دگرسانی‌های بعدی مهم‌ترین نقش را در کانه‌زایی داشته و کانه‌زایی ارتباط چندانی با ساختارها نشان نمی‌دهد، هرچند نفوذ توده در سنگ‌های بالایی، قطعا در ارتباط به ساختار بوده و از ساختارهای خاصی تبعیت کرده است اما این ساختارهای اولیه، در حال حاضر مشهود نیستند و اثری از آنها دیده نمی‌شود. با توجه به شواهد اکتشافی و سنگ‌های نیمه‌عمیق به خصوص در گمانه شماره ۲، به نظر می‌رسد که محل تشکیل کانی‌زایی نزدیک به حاشیه توده نفوذی و همبری آن با سنگ‌های آتشفشانی یا آذرآواری بوده که در حفاری‌های کنونی اثری از آنها به دست نیامده است.

زمان کانی‌زایی: با توجه به اینکه واحد رسوبی - تخریبی به سن ژوراسیک - تا کرتاسه با ضخامتی بین ۱۳۰۰ تا ۱۵۰۰ متر و بدون ناپیوستگی روی سنگ‌های آذرآواری، متاسوماتیت و کانه‌دار واقع شده و در ضمن هیچ‌گونه شواهدی هم از متاسوماتیسم و کانه‌زایی ندارد، لذا سن توده نیمه‌نفوذی، متاسوماتیسم و سنگ میزبان کانی‌زایی قدیمی‌تر از کرتاسه و مشخصا مربوط به پالئوزوییک زیرین است که در سن‌سنجی به روش‌های ایزوتوپی، تدقیق گردیده است.

سنگ میزبان: سنگ میزبان کانه زایی آهن عمدتا واحدهای نیمه نفوذی هستند که با شدت متغیر کم تا زیاد دچار دگرسانی به‌ویژه کلریتی و ترمولیت-اکتینولیت شده‌اند. آثار و شواهد دگرگونی و شیستوزیته در همه نمونه‌های کانسنگی مشهود است.

پتانسیل عناصر جزئی و خاکی کمیاب و کانی‌های مستقل احتمالی برای این عناصر

کانسار آنومالی آهن 21A از نظر ژئوشیمیایی شباهت بسیار زیادی به کانسارهای تیپ کایرونا دارد. مقادیر ΣREE این کانسار در نمونه سنگ در گستره تغییرات ppm ۴۳۹۸۰- ۹۱۵ قرار می‌گیرد. تمرکز ایتربیم (Yb) در آپاتیت‌های این کانسار در محدوده تغییرات بین ppm ۶۶۵ -۶/۴، توریم (Th) و اورانیم (U) به‌ترتیب در گستره تغییرات ppm ۲۷۳ – ۰/۰۷و ppm ۸/۵– ۰/۰۵ و نسبت Th/U به ترتیب ۰/۸ تا ۱۶۴ قرار می‌گیرند. مقادیر وانادیم (V) عمدتا کمتر از ppm ۷۷، ایتریم (Y) در گستره ppm ۱۱۰۰۰-۲۸۳ (با میانگین ppm ۱۸۵۱) و استرانسیم (Sr) در محدوده تغییرات ppm ۴۶۶-۲۷۸ قرار می‌گیرند. تمامی نمونه‌ها الگوهای REE مشابهی را نشان داده‌اند. تمامی آپاتیت‌ها آنومالی Eu منفی مشخصی (Eu/Eu*=۰/۱۴ -۰/۲۷) نشان می‌دهند. بر روی نمودارهای بهنجار شده به کندریت، آپاتیت‌های کانسار آهن-آپاتیت‌دار آنومالی آهن 21A ، احتمالاً چند نسل از آپاتیت را نشان می‌دهند. به طوری‌که مقادیر La و Ce آنها در یک گستره ۱۰۰ تا ۴۰۰۰۰ قرار گرفته است. به طور کلی یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های ژئوشیمیایی کانسارهای آهن-آپاتیت تیپ کایرونا، وجود درصد بالایی از عناصر خاکی کمیاب در گستره تغییرات ppm۶۷۰۰-۱۲۵۰ است.

به طور کلی غنی‌شدگی‌های عناصر خاکی کمیاب در کمربند متالوژنیک آهن ایران مرکزی، همانند نهشته‌های نوع کایرونا عمدتا در آپاتیت متمرکز شده‌اند. چنین الگوهای مشابه تلویحا دلالت بر منشا یکسان نهشته‌های آپاتیت-اکسیدآهن دارد.

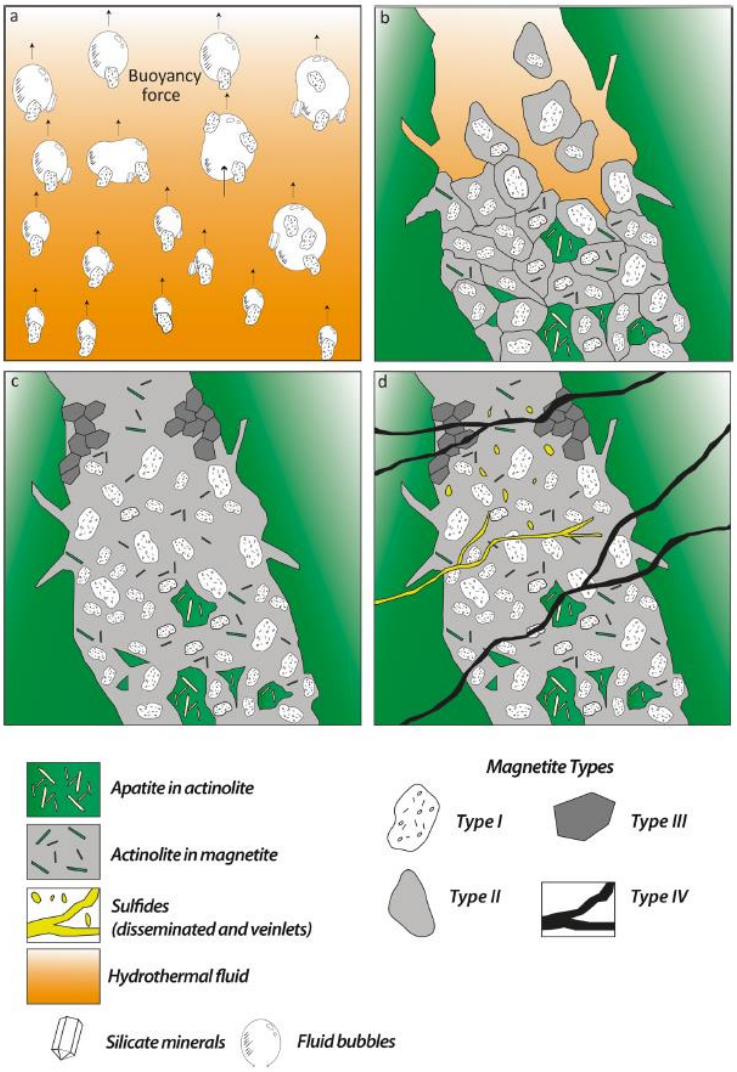
رده‌بندی و مدل تشکیل کانسار

زمانی، گاندی (۲۰۰۳ و ۲۰۰۴) به طور کلی ذخایر آهن مرتبط با فرایندهای ماگمایی – گرمابی را به شش دسته اصلی تقسیم کرد: تیپ اسکارن، کایرونا، المپیک دم، کلانکاری، پالابورا، و بایان اوبو که در این تقسیم‌بندی، کلیه ذخایر آهن مرتبط با ماگما را آورد. کوریوو (۲۰۰۷) در مقاله‌ای با *عنوان ذخایر اکسید آهن-مس-طلا، یک دیدگاه کانادایی*، کانسارهایی که هیتزمن (۱۹۹۲) آنها را IOCG نامیده بود، شرح داد و آنها را به عنوان کانسارهایی با طیفی گسترده از کان‌توده‌های مگنتیت و/یا هماتیت فقیر از سولفید، کم تیتانیم، با منشا گرمابی معرفی کرد که در آنها کانه‌زایی برشی، رگه‌ای، و توده‌ای با غنی‌شدگی چندفلزی (مس، طلا، نقره، اورانیم، عناصر خاکی کمیاب، بیسموت، کبالت، نیوبیم، و فسفر) به طور ژنتیکی با ماگماتیسم نوع I یا A قاره‌ای بزرگ‌مقیاس، استوک‌های قلیایی – کربناتیتی، و زون‌های گسلی در مقیاس قاره‌ای و دگرسانی سدیک - کلسیک ناحیه‌ای همراهند (در فاصله نزدیک یا دور). این ذخایر بیش از ۲۰ درصد اکسید آهن دارند. این کانسارها در سطوح کم عمق تا متوسط پوسته در مناطق کششی، کوهزادی یا غیرکوهزادی شکل می‌گیرند، مانند کافت‌های درون‌کراتونی، کمان‌های ماگمایی قاره‌ای و حوضه‌های پشت‌کمانی. کوریوو (۲۰۰۷) تردید دارد که این کانسارها به دلیل تنوع زیادی که دارند آیا یک نوع کانسار هستند یا انواع غنی از آهن کانسارهای دیگر هستند. اما وی تمایل دارد آنها را یک دسته خاص و منحصر بفرد بداند و همه کانسارهای

حاوی آهن زیاد و چندفلزی‌های همراه با نیوبیم و عناصر خاکی کمیاب را عضوهای انتهای طیف وسیع IOCG در نظر بگیرد. وی همه کانسارهای تقسیم‌بندی گاندی را در دسته IOCG قرار می‌دهد. پس از وی، بارتون و بسیاری محققان دیگر، تقسیم‌بندی‌های دیگری ارائه دادند و امروز آنچه توافق عمومی بر آن است که دسته IOCG کانسارهای آهن همراه با مس، طلا، اورانیم هستند که تصور می‌شود بر اثر فرایندهای گرمابی به وجود آمده باشند و دسته دیگری از کانسارها که فاقد سولفید بوده و در آنها آهن به عنوان عنصر اصلی و علاوه بر آن آپاتیت نیز وجود دارد، با عنوان کانسارهای اکسید آهن – آپاتیت IOA یا تیپ کایرونا معرفی شد که علیرغم ارتباط ژنتیکی با دسته قبل، از آن متمایز هستند.

در حال حاضر، این دو دسته به عنوان دو تیپ متفاوت در نظر گرفته می شوند که مدل تشکیل مرتبط با یکدیگر دارند و برای تشکیل آنها مدل‌های زیادی ارائه شده اما در حال حاضر، سه مدل اصلی دارای طرفداران خاص خود است. ۱) مذاب‌های ناهمامیز آهن و فسفر و کربنات و سولفات، ۲) متاسوماتیسم، ۳) فرایندهای ماگمایی – گرمابی. هم اکنون هر کدام از این مدل‌ها طرفدارانی دارد و تفکر استرالیا و امریکا بیشتر به سوی مدل سوم است که البته باز هم در جزییات با یکدیگر اختلاف نظر دارند.

پروفسور سایمون استاد دانشگاه میشیگان بر اساس مطالعات پانزده سال گذشته و پژوهش‌های گسترده روی این کانسارها در بسیار کشورها از جمله شیلی، مدلی را به همراه دانشجوی خود در سال ۲۰۱۵ ارائه داد که به مدل شناوری معروف است و در شکل ۲ آورده شده است. براساس این مدل که توسط نیپینگ و همکاران (۲۰۱۵) ارائه و سایمون و همکاران (۲۰۱۸) اصلاح شد، میکرولیت‌های مگنتیت در ماگمای در حال تبلور در عمق ۲ تا ۳ کیلومتر شروع به تبلور می‌کنند و با مذاب، در حالت تعادل هستند. به دلیل فروریزش کالدرای آتشفشانی که این محفظه ماگمایی در زیر آن قرار دارد، فشاربرداری decompression از روی محفظه ماگمایی باعث خروج حباب‌های ریز سیال و مواد فرار از ماگما می‌شود که بر روی مگنتیت‌های ماگمایی هسته‌بندی و شروع به رشد می‌کنند. این فاز سیال می‌تواند مگنتیت را در مذاب آندزیتی شناور کرده و به بالا ببرد و تا جایی بالا می‌رود که شناوری صفر شده و مگنتیت در همانجا باقی می‌ماند. در طی تبلور و صعود، اکتینولیت نیز به همراه آپاتیت اضافه می‌شود و مگنتیت را همراهی می‌کند. این اجتماع که در اعماق متوسط یک سیستم ساب ولکانیک جایگیر می‌شود، یک کانسار IOA را به وجود می‌آورد. بنابراین، سیال عامل این کانه‌زایی، یک سیال ماگمایی – گرمابی است. در مرحله بعد، سیستم گرمابی متعاقب این فاز، به سمت بالا آمده و کانسارهای IOCG را بر روی بخش بالایی IOA اعمال می‌کند و از این روست که سایمون و تیم ایشان باور به همراهی این دو سیستم دارند که در قالب این مدل قابل توجیه است.



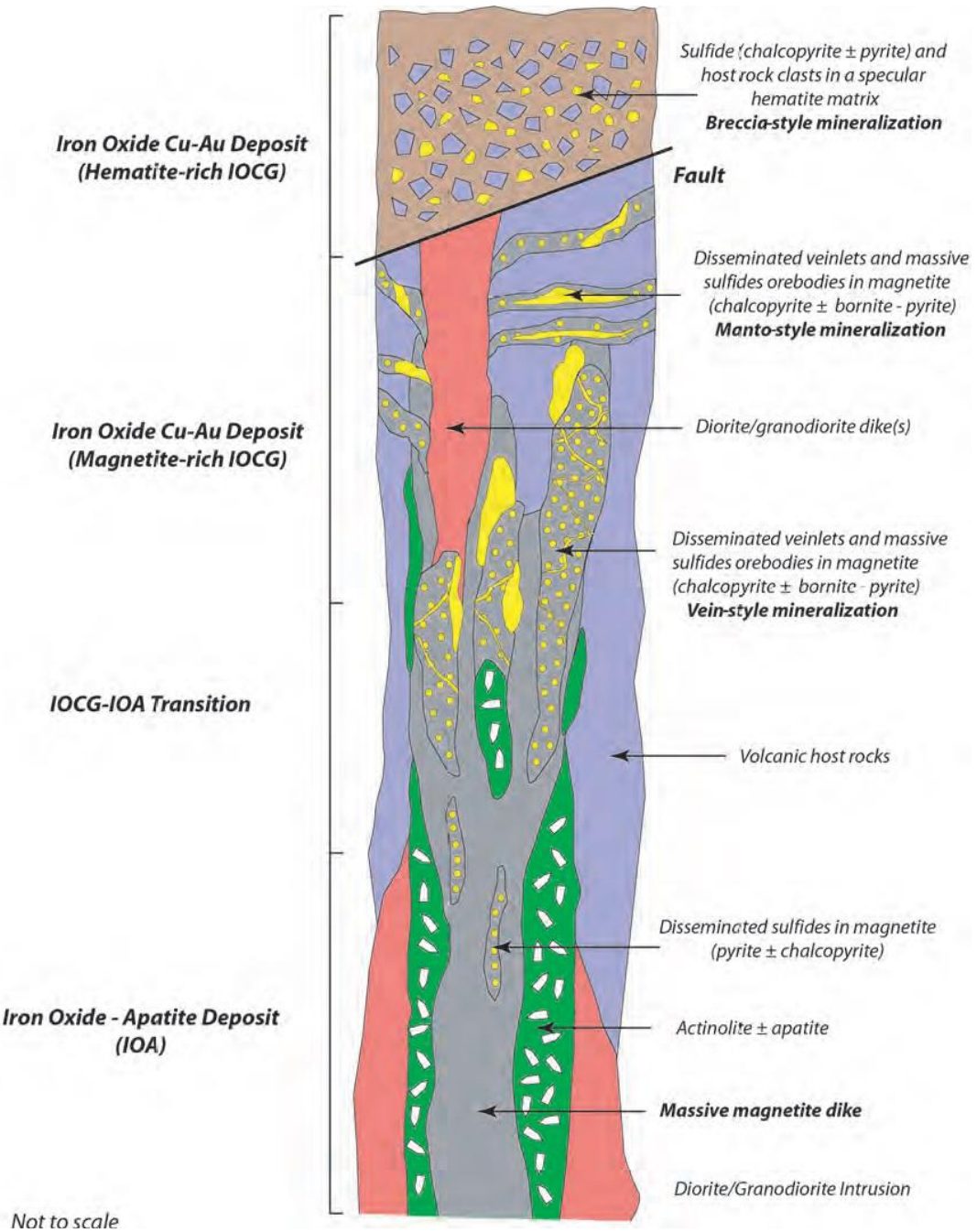
شکل ۲ مدل شناوری برای تشکیل کانسارهای اکسید آهن از نیپینگ و همکاران ۲۰۱۵ و سایمون و همکاران ۲۰۱۸

بر اساس مدل سایمون، کانسارهای آهن با یکدیگر ارتباط ژنتیکی دارند و در صورت اکتشاف یک گروه، احتمال یافتن گروه دیگر نیز وجود دارد.

با توجه به شواهد به دست آمده از این مطالعه، مدل تشکیل آنومالی ۲۱ بر اساس مدل سایمون و همکاران، از نوع کانسارهای IOA است و در اینجا این مدل را برای تشکیل آن معرفی می‌کنیم.

با توجه به نتایج پژوهش حاضر، در کانسارهای مورد مطالعه، آپاتیت‌ها همانند آپاتیت‌های گزارش شده از ناحیه بافق، غنی از فلوئور و فقیر از کلر هستند. ترکیب ژئوشیمیایی آپاتیت در کانسارهای تیپ کایرونا و کانسارهای تیپ IOCG تفاوت‌های اساسی دارد. آپاتیت در کانسارهای تیپ کایرونا غنی از F و LREEs است، در صورتی که در کانسارهای IOCG، غنی از Cl است و نسبت به LREEs تهی‌شدگی نشان می‌دهد (Edfelt et al., 2007). واقع شدن نمونه‌های مورد مطالعه، در محدوده

سنگ‌های مافیک و کانسارهای آهن تیپ کایرونا، به نقش توده‌های نفوذی در زایش کانسارهای مگنتیت-آپاتیت در ناحیه بافق اشاره دارد. به طور کلی یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های ژئوشیمیایی کانسارهای آهن-آپاتیت تیپ کایرونا، وجود درصد بالایی از عناصر خاکی کمیاب در گستره ۱۲۵۰-۶۷۰۰ppm است (Parak, 1975; Frietsch and Perdahl, 1995; Kerr, 1998).



شکل ۳ ارتباط سیستم IOA و IOCG (سایمون و همکاران، ۲۰۱۸)

آپاتیت‌های کانسارهای آهن-آپاتیت (مانند کانسارهای چادرملو، میشدوان، چاه‌گز، گزستان، اسفوردی و لکه سیاه) از نظر ژئوشیمیایی شباهت‌هایی با یکدیگر دارند که از آن جمله می‌توان به غنی‌شدگی از LREE، نسبت بالای LREE/HREE، الگوهای HREE مسطح در تمامی آپاتیت‌ها و آنومالی منفی Eu اشاره نمود که این شبیه به کانسارهای نوع کایرونا هستند (Daliran, 2002؛ Jami, 2005؛ Torab, 2010؛ Mokhtari et al., 2013). چنین الگوهای مشابه تلویحاً دلالت بر منشا یکسان کانسارهای آپاتیت-اکسیدآهن دارد. فراوانی REE آپاتیت‌های کانسارهای کایرونا در گستره تغییرات ۷۰۰۰ mg/kg-۲۰۰۰ است (Frietsch and Perdahl, 1995). در مقایسه، آپاتیت‌های کانسارهای آهن‌آپاتیت‌دار کمربند متالوژنیک آهن ایران مرکزی در برخی موارد محتوای بالاتر از ۲ درصد وزنی REE را از خود نشان می‌دهند.

آپاتیت‌های آنومالی آهن 21A با میانگین مقادیر Y و Sr به‌ترتیب ۴۷۱۲۴ ppm و ۴۸۹ ppm بر اساس نمودارهای Sr در برابر Y با تفکیک واضح از کربناتیت‌ها، غالباً در محدوده سنگ‌های مافیک و کانسارهای آهن تیپ کایرونا واقع شده‌اند. واقع شدن نمونه‌های مورد مطالعه آنومالی آهن 21A (مانند سایر کانسارهای ناحیه بافق)، در محدوده سنگ‌های مافیک و کانسارهای آهن تیپ کایرونا، به نقش احتمالی توده‌های نفوذی مافیک در زایش کانسارهای مگنتیت-آپاتیت در ناحیه بافق اشاره دارد.

همچنین از آنجا که سنگ میزبان کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت ایران مرکزی، عمدتاً توده‌های نفوذی با ترکیب حدواسط تا اسیدی است، پس می‌توان گفت که بی‌هنجاری منفی Eu در آپاتیت‌های منطقه مورد مطالعه، احتمالاً مربوط به تبلور پلاژیوکلاز در طی مراحل اولیهٔ تبلور ماگمایی می‌باشد. هم‌چنین، اکسیده بودن محیط به دلیل وجود مگنتیت و هماتیت نیز می‌تواند دلیلی بر تهی‌شدگی Eu باشد.

سن‌سنجی U-Pb بر روی فازهای اولیه آپاتیت‌ها در مناطق مورد مطالعه سن ۵۲۹±۲۵ Ma برای نمونه چادرملو، سن ۵۴۳±۳۲ Ma و ۵۱۷±۲۵ Ma برای نمونه چاه‌گز و سن ۵۳۳±۱۹ Ma را برای نمونه میشدوان حاصل نموده است. این سن‌های به‌دست آمده مشابه کانسارهای چغارت (Torab and Lehmann, 2007) و نیز توده‌های نفوذی زریگان است. بنابراین، سن آپاتیت دلالت بر این دارد که فاز سیال تشکیل دهنده کانی آپاتیت هم‌زمان با توده‌های نفوذی بوده است. تحقیقات زیر به‌خوبی نشان می‌دهد که سن‌سنجی‌های به‌عمل آمده از کمربند متالوژنیک آهن بافق (BIMB) همزمان یا بعد از جایگیری گرانیت‌های زریگان و نریگان (۵۲۵ تا ۵۴۵ میلیون سال) می‌باشند. زمان تشکیل این حوزه متالوژنیک براساس سن سنجی U-Th-Pb کانی مونازیت در گستره زمانی ۵۱۵ ±۲۱ Ma تا ۵۲۹ ±۲۱ Ma (Torab and Lehmann, 2007)، بر اساس سن سنجی U-Pb بر روی مونازیت در گستره زمانی ۵۲۷ تا ۵۳۹ میلیون سال (Stosch et al., 2011) و ۵۱۰ ±۸ Ma (Bonyadi et al., 2011) می‌باشند. ارتباط زمانی و فضایی نزدیک کانسارهای آپاتیت -اکسیدان با سنگ‌های نفوذی/نیمه نفوذی پیشنهاد می‌کند که کانه‌زایی و ماگماتیسم کامبرین زیرین هم‌زمان و در ارتباط با یکدیگر بوده است.

جمع‌بندی و پیشنهادها

ذخایر و کانسارهای بزرگ در جهان رو به پایان هستند و کشف ذخایر کوچک، زمان و منابع قابل توجهی را صرف می‌کند که برای شرکت‌های بزرگ اقتصادی نیست. لذا ضروری است تا شرکت‌های بزرگ، با نگرش آینده‌پژوهانه و برای تامین نیازهای کشور در سال‌های نه چندان دور، با تکنیک‌های اکتشافی پیشرفته و با حفر گمانه‌های عمیق (تا بیش از یک کیلومتر) به تاریخچه شکل‌گیری دقیق‌تر توده‌های کانه‌دار و در نتیجه اکتشاف ذخایر ژرف بپردازند. شناخت دقیق از بخش بالایی پوسته، ساختار پوسته و تحولات ژئودینامیکی در زون‌های ساختاری-رسوبی از مزیت‌های چنین حفاری‌هایی است.

به طور کلی اکتشافات ذخایر پنهان براساس مطالعات ژئوفیزیکی عمیق، حفر گمانه‌های عمیق برای شناخت پوسته، انجام مطالعات متالوژنیکی-ژئودینامیکی و ارائه مدل‌های اکتشافی نوآورانه بر مبنای مفاهیم جدید متالوژنی مورد نیاز است.

علیرغم مطالعات زیادی که بر روی زون بافق انجام شده، ناشناخته‌ها و نکات مبهم بسیاری در چگونگی پیدایش این بخش از ایران مرکزی و نحوه شکل‌گیری این کانسارها و راهبردهای اکتشافی برای شناسایی کانسارهای پنهان این بخش بویژه اکتشاف معادن و آنومالی‌های آهن وجود دارد که مستلزم توجه ویژه است.

طرح حفاری گمانه‌های ژرف در آنومالی ۲۱، اقدامی پیشگام برای شناسایی ذخایر و کلیدی بر اکتشاف این ذخایر در عمق بود که دستاوردهای بسیار شگرفی را به دنبال داشت. این شرکت، با دیدگاه آینده‌نگرانه، پیش از پایان یافتن ذخایر آهن کشور، این اقدام را انجام داد چون آینده جهان به سمت ذخایر واقع در عمق زیاد یا شرایط خاصی است که در حال حاضر امکان بهره‌برداری از آنها را نمی‌دهد.

این عملیات، و در پی آن پژوهش حاضر، بررسی مغزه‌های آنومالی آهن 21A (XXIA) و طبعا دسترسی به سنگ‌هایی با عمق حدود ۲۰۰۰ متر در ایران مرکزی را برای اولین بار فراهم کرد و امکان وجود ذخایر چشمگیری را به صراحت نشان داد. این آنومالی، پیش‌تر بر مبنای مطالعات ژئوفیزیکی اکتشاف شده بود و در طی حفاری اکتشافی و مطالعات اخیر نشان داده شد که در گمانه اول در عمق ۱۶۱۰ متری به کانسنگ **آهن مگنتیتی به ضخامت نزدیک به ۲۰۰ متر** برخورد نموده که می‌تواند ذخیره قابل توجهی را در خود داشته باشد و طبعا بررسی و مقایسه آن با دیگر کانسارهای آهن از یکسو و مطالعات پتروژنتیکی (ژئوشیمیایی، سن‌سنجی، ایزوتوپی) سنگ‌های دربرگیرنده آن می‌تواند بر روشن‌شدن سیمای کانه‌زایی و ماگماتیسم این مناطق کمک‌ساز باشد.

برآورد ذخیره بر اساس یک گمانه منطقی نیست اما قیاس این منطقه با ذخایر شناخته شده در دیگر کانسارهای منطقه و جهان نشان می‌دهد که در اینجا حداقل با ذخیره‌ای قابل مقایسه با چادرملو روبه‌رو هستیم و در آینده نزدیک که کشور با کمبود منابع آهن مورد نیاز صنایع رو به رشد روبه‌رو شود، ناگزیر باید به سوی این ذخایر رفت و این اکتشاف پیشگام، بارقه امید و نشانه‌ای بر وجود ذخایر بزرگ در مقیاس جهانی در این منطقه است که امید است با مطالعات بیشتر و ادامه فعالیت مشابه در نقاط دیگر، به شناسایی ذخایر دیگری که احتمالا در اعماق کمتر (یا بیشتر) قرار دارند، بینجامد.

وجود این ذخیره در اینجا، نشان می‌دهد که گرانیتوییدهای منطقه (از نوع زریگان) در هر جا که حضور دارند، می‌توانند ذخایر قابل توجهی را ایجاد نمایند و این نتیجه مهم حاصل شد که مهم‌ترین کنترل‌کننده اصلی کانه‌زایی در آنها، وجود توده نفوذی است و حتی بدون وجود سنگ‌های آتشفشانی – نفوذی پیرامون، می‌تواند منجر به ایجاد کانسار شوند.

مهم‌ترین نکته در خصوص آنومالی آهن 21A با در نظر گرفتن هزینه بالای هر متر حفاری عمیق، بالابردن دقت قبل از هرگونه حفاری مجدد است. نتایج مطالعه حاضر مشخصا نشانگر رفتار نامنظم ماده معدنی در زون کانی‌سازی از یک سو و از سوی دیگر خاصیت مغناطیسی سنگ میزبان در برگیرنده است که موجب تفسیر ژئوفیزیکی نامطمئن در انتخاب نقاط پیشنهادی حفر گمانه شده است و به نوعی آنومالی کاذب بزرگی را در منطقه ایجاد کرده است. اگرچه پیش از حفاری‌های فعلی شناسایی آنومالی کاذب با توجه به نبود داده‌های عمقی امکان پذیر نبوده است. پیشنهاد می‌شود قبل از هرگونه حفاری جدید مطالعات و بررسی خاصیت مغناطیسی سنگ میزبان و ماده معدنی در سه گمانه حاضر به صورت دقیق انجام و پس از تعیین ماهیت مغناطیسی سنگ میزبان نتایج ژئوفیزیکی موجود باز تفسیر شوند.

نکته مهم دیگر شیب منطقه می‌باشد که تا حد امکان می‌بایست در انتخاب گمانه‌ها در ابتدا دقت لازم صورت پذیرد تا با حداقل متراژ حفاری بیشتر راندمان ممکن حاصل شود.

با توجه به لاگینگ مغزه‌های موجود، مشخصا پس از اتمام سکانس رسوبی واحدهای توفی و نفوذی و نیمه نفوذی منطقه به عنوان لایه‌های کلیدی قابل مشاهده می‌باشند که آشنایی هر چه بیشتر ناظران لاگینگ در حین حفاری با واحدهای مذکور و شناسایی صحیح نوع و شدت دگرسانی همراه با کانه‌زایی اصلی می‌تواند در کاهش هزینه‌ها و بهره‌وری بیشتر عملیات حفاری موثر باشد.

با توجه به وجود ذخیره قابل توجه در گمانه ۱ و نبود آن در گمانه ۳ و نیز کانه‌زایی اندک در گمانه ۲، به نظر می‌رسد که روند کانه‌زایی به سمت جنوب شرق گسترش داشته و نقطه با مختصات ۳۷۶۳۱۲.۰۰ شرقی و ۳۶۱۳۲۳۲.۰۰ شمالی بتواند گسترش آنومالی را پس از انجام مطالعات ژئوفیزیک به شرح گفته شده در بالا، تعیین کند.