

## مطالعات ژئوشیمیایی، کانی‌شناسی و سیالات درگیر کانسار مس، نیکل، کبالت و اورانیوم مسکنی، انارک (ایران مرکزی)

بهمن مختارزاده محمدی و هاشم باقری\*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

### چکیده

کانسار مسکنی در ایران مرکزی و ناحیه دگرگونه انارک - خور قرار دارد. مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع صیقلی، نازک صیقلی و نازک دو بر صیقل تهیه شده از نمونه‌های کوارتز و کلسیت موجود در رگه‌های کانهدار انجام گرفت. کانه‌های مشاهده شده در مقاطع صیقلی، شامل: کالکوسیت، نیکلین، کالکوپیریت، راملزبرژیت و ملاکیت است که کانه راملزبرژیت در اطراف نیکلین قابل مشاهده و نشان‌دهنده ته نشست نیکل و افزایش میزان آرسنیک در محلول‌های کانهدار است. بیشتر سیالات درگیر مطالعه شده از نوع دو فازی غنی از مایع (L + V) هستند. از نظر ژنتیکی، انواع مطالعه شده به صورت اولیه هستند. در این مطالعات بر اساس آزمایش انجماد، دمای ذوب آخرین یخ سیالات درگیر (T<sub>im</sub>) از ۱/۶- تا ۱۸/۵- درجه سانتی‌گراد و شوری آن‌ها ۲۲/۵ - ۲ درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه شد. در آزمایش گرم کردن، دمای همگن شدن اکثر سیالات درگیر در محدوده ۱۶۰ - ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. نمودار دمای همگن شدن - شوری سیالات درگیر، نشان می‌دهد که سیالات کانهدار دارای دو منشأ کاملاً متفاوت هستند که این امر می‌تواند بیانگر کانه‌زایی در دو مرحله جداگانه یا سیالات کانه‌زا با دو منشأ کاملاً متفاوت باشد. احتمالاً یکی از آن‌ها منشأ ولکانیکی و دیگری منشأ شورابه‌های حوضه‌ای را نشان می‌دهد. در تجزیه‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های جمع‌آوری شده از مناطق مختلف کانسار مسکنی عناصر کبالت، نیکل، مس، روی، سرب، توریم، اورانیوم، زیرکونیوم و استرانسیم اندازه‌گیری شدند که از این میان، کبالت، نیکل، مس و اورانیوم اهمیت بیشتری دارند. نمودارهای پراکندگی این عناصر ترسیم و همبستگی آن‌ها نسبت به هم تعیین شد. نتایج این تجزیه‌ها نشان داد که میانگین عناصر اورانیوم، توریم، نیکل و مس به ترتیب ۲۶۹، ۲۶، ۴۵۲ و ۱۰۷۸۶ ppm است. ویژگی جالب دیگر، همبستگی معکوس بین میزان اورانیوم و نسبت Th/U است. این ویژگی نشان می‌دهد که میزان بالای اورانیوم در این سنگ‌ها در ارتباط با تفریق ماگمایی نیست. برخلاف نمونه‌های رگه‌ای، همبستگی بین تغییرات اورانیوم، مس و نیکل در نمونه‌های سنگ میزبان وجود ندارد. این مشخصه یکی از ویژگی‌های شاخص شوشونیت‌ها و آندزیت‌های سنگ میزبان کانه‌زایی در این منطقه است که نشان می‌دهد این عناصر از سنگ میزبان منشأ نگرفته‌اند. مطالعات ژئوشیمیایی و پتروگرافی وجود سنگ میزبان با ماهیت ماگمای شوشونیتی را نشان داده است.

**واژه‌های کلیدی:** ژئوشیمی، سیالات درگیر، کانسار مسکنی، ناحیه دگرگونه انارک - خور

## مقدمه

کانسارها و نشانه‌های معدنی مس در ایران، وابستگی تنگاتنگی با سیستم ماگمایی جوانتر از کرتاسه دارند (خویی و همکاران ۱۳۸۷). از میان هفت کانسار عمدتاً کوچک برای مس، نیکل و کبالت منطقه انارک، تالمسی و مسکنی دو کانسار مهم و تنها کانسارهایی هستند که مس، نیکل و کبالت را با هم تولید کرده‌اند. هیچ‌گونه گزارشی درباره شروع معدن کاری در منطقه وجود ندارد، اما معدن کاری در این منطقه در سال ۱۹۶۰ متوقف شده، معادن هم اکنون تحت مراقبت و محافظت هستند. اخیراً کانه‌زایی اورانیم در این کانسارها کشف شد (Sarcia and Sarcia, 1960) و این امر فعالیت‌های اکتشافی مجددی را توسط سازمان انرژی اتمی ایران برانگیخت. کانسارهای معدنی منطقه، همچنین دارای غنی‌شدگی آرسنیک و به میزان کم سرب، روی، طلا و نقره هستند. ساختمان درونی افیولیت‌های انارک با افیولیت‌هایی که در مراکز گسترش بستر اقیانوس‌ها شکل گرفته‌اند متفاوت است؛ هرچند که وقایع بعدی این ساختمان را به هم ریخته‌اند. اجزای سازنده این افیولیت‌ها به عناصری محدود می‌شود که در درون هارزبورژیت‌های میزبان واقع شده‌اند (باقری، ۱۳۷۲). بیشتر کانه‌زایی‌های مس انارک در مناطق ولکانیکی ائوسن، هم‌زمان هستند. همه اندیس‌های مس شناسایی شده با منشأ ولکانیکی بین منطقه ولکانیکی کوه دم و اطراف آن واقع شده است. این کانه‌زایی‌ها در مناطق گسله و یا در مناطق ضعیف تکتونیکی مشاهده می‌شوند. از مهمترین نهشته‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، نهشته‌های گرمایی مس - نیکل - کبالت با ترکیبی بسیار پیچیده است. ترکیب کانیایی و جایگاه زمین‌شناسی این نهشته‌ها مشابه با تشکیلات پنج عنصری است (Bagheri et al., 2007). همچنین، بر طبق نظر بعضی از محققان نهشته‌های تالمسی و

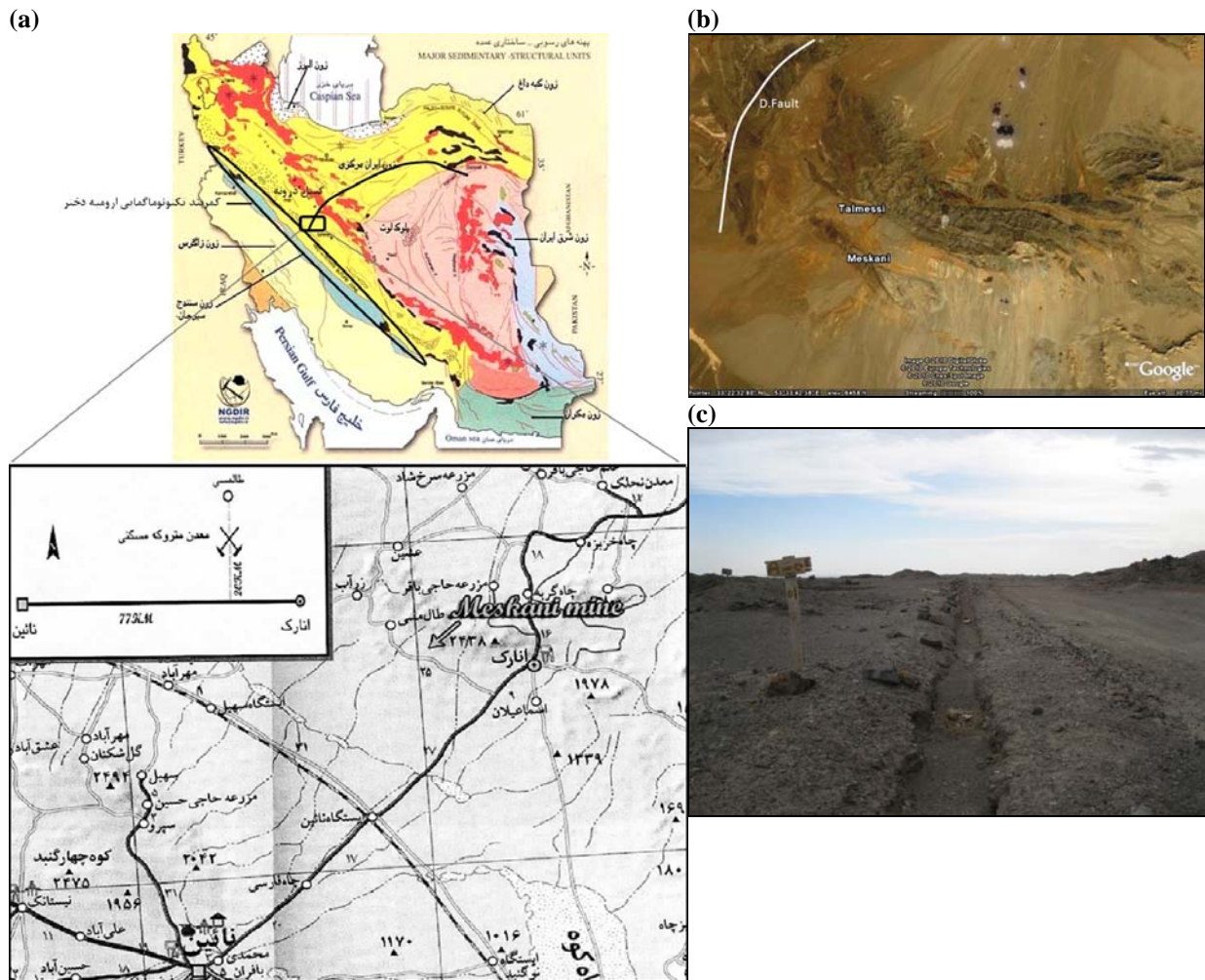
مسکنی با کمپلکس‌های ولکانیکی ائوسن (شوشونیت‌های عشین) ارتباط تنگاتنگی دارند و از انواع ولکانوژنیک هستند (احمدی، ۱۳۸۱). علی‌رغم اهمیت اقتصادی و مطالعات فشرده، هنوز هم مطالعات برروی ژنز آن‌ها ادامه دارد.

کانسار مس، نیکل، کبالت و اورانیم مسکنی در ۲۲ کیلومتری غرب انارک و ۱۸ کیلومتری جنوب روستای عشین و در مختصات جغرافیایی  $53^{\circ}$  و  $27'$  و  $00''$  طول شرقی و  $33^{\circ}$  و  $19'$  و  $30''$  عرض شمالی واقع است (شکل ۱). برای دسترسی به کانسار می‌توان از جاده آسفالت‌نایین - انارک استفاده نمود که در ۹ کیلومتری انارک، راه شنی به طرف غرب جدا می‌شود و پس از طی مسیر ۲۵ کیلومتری به روستای تالمسی می‌رسد و معدن مسکنی در ۶ کیلومتری شرق روستای تالمسی قرار دارد (شکل ۱).

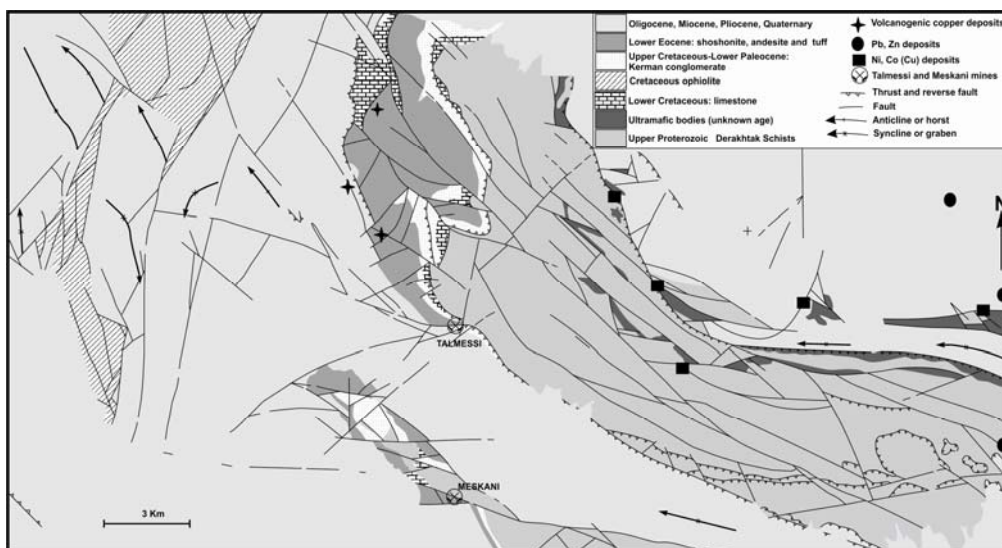
## زمین‌شناسی منطقه

کانه‌زایی مس، نیکل، کبالت، آرسنیک و اورانیم در منطقه انارک در محل تقاطع کمربند ماگمایی ارومیه - دختر با گسل بزرگ کویر - درونه رخ داده است (شکل‌های ۱ و ۲). مطالعات ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که این ماگماتیسیم در این منطقه وابسته به فرورانش بوده است (Bagheri et al., 2007).

منطقه‌بندی مشخصی از کانسارها در منطقه انارک وجود دارد. از غرب به شرق، سه نوع کانسار مس قابل تشخیص است: ۱- کانه‌زایی مس در ارتباط با ولکانیک‌های ائوسن؛ ۲- کانه‌زایی مس، نیکل، کبالت، اورانیم با نسبت  $Cu/(Ni + Co)$  که از ۲ تا ۵۰ همراه با سنگ‌های ولکانیک تغییر می‌کند؛ ۳- کانی‌زایی مس، نیکل، کبالت و آرسنیک با نسبت متغیر  $Cu/(Ni + Co)$ ،  $0.2/0$  که در ۵ تا ۲۰ کیلومتری شرق از ولکانیک‌های ائوسن توزیع شده‌اند (Bagheri et al., 2007).



شکل ۱- (a) و (b) موقعیت منطقه از لحاظ زون‌بندی، راه‌های دسترسی به منطقه و نمایش تصویر ماهواره‌ای آن، (c) حفر ترانشه به منظور نمونه‌برداری



شکل ۲- ساختارهای مهم زمین‌شناسی، تکتونیکی و موقعیت کانسارهای مسکنی و تالمسی در منطقه مورد مطالعه (Bagheri et al., 2007)

شرقی - غربی و شمال غرب - شمال شرق به صورت یک بلوک مثلثی شکل رخنمون دارد. در یال جنوب غربی تاقدیس، نهشته‌های ماسه سنگ، مارن، سنگ آهک و کنگلومرای سازند سهلاب به صورت هم‌شیب بر روی مجموعه آتشفشانی سازند گرگاب قرار گرفته، خود به طور ناهمساز توسط کنگلومرا و مارن قرمز رنگ الیگوسن معادل سازند قرمز زیرین پوشیده می‌شود. در یال شمال شرقی تاقدیس نهشته‌های سازند سهلاب رخنمون نداشته، مجموعه ماسه سنگ، کنگلومرا و مارن و بین لایه‌های توف و گدازه‌های آندزیتی ائوسن بالا - الیگوسن با مرز گسلیده بر روی سنگ‌های قدیمی تر قرار دارد، که به طرف بالا به صورت ناهمساز توسط مجموعه سازند قرمز زیرین که دارای رخساره عمدتاً مارنی و ماسه سنگی و کمتر کنگلومرای است، پوشیده می‌شود. نهشته‌های کواترنری شامل پادگانه‌ها و مخروط افکنه‌های قدیمی و بلند دشت، پادگانه‌ها و مخروط افکنه‌های جوان دشت میانی و نهشته‌های دلتایی و پست دشت است. نهشته‌های بلند دشت، شامل: کنگلومرا با قطعات درشت در زمینه رسی و سیلتی، نهشته‌های جوان دشت میانی شامل کنگلومرا با قطعات متوسط و ریز در زمینه رسی و سیلیسی و نهشته‌های دلتایی و پست دشت شامل عمدتاً رس، سیلت و ماسه است.

همان‌طور که در بالا به آن اشاره شد، نقش خطواره‌ها و تکتونیک در کانه‌زایی در منطقه انارک شایان توجه است. مناطق کانه‌زایی در محل برخورد دو خطواره مشاهده می‌شود، زیرا در این نواحی صعود ماگما و سیالات گرمابی تسهیل می‌شود. دو خطواره‌ای که در منطقه انارک یکدیگر را قطع می‌کنند، هردو در زمان

محدوده کانسار تاقدیس نامتقارنی با امتداد شمال غرب - شمال شرق را به نمایش می‌گذارد که توسط گسله‌های شمال غرب - شمال شرقی، شمال شرق - جنوب غربی و شرق - شمال شرقی به هم ریخته شده و جا به جایی در آن صورت گرفته است (Romanko *et al.*, 1984). در هسته تاقدیس دگرگونه‌های سازند درختک رخنمون داشته، شامل سه واحد به شرح زیر هستند:

- بخش زیرین شامل مجموعه مسکوویت، اپیدوت، کلریت، شیست، پایین لایه‌های آهک مرمری شده است؛
- بخش میانی شامل مجموعه کلریت، مسکوویت، اپیدوت، شیست، پایین لایه‌های کوارتزیت است؛
- بخش فوقانی شامل مجموعه مسکوویت، کلریت، اپیدوت، اکتینولیت شیست است.

بر روی مجموعه دگرگونه سازند درختک واحد معادل کنگلومرای کرمان به سن پالئوسن به صورت دگرشیب قرار گرفته که خود یک کنگلومرای پلی ژنتیک با قطعات ریز و درشت گرد شده شامل سنگ‌های دگرگونه و سنگ آهک خاکستری کرتاسه زیرین اوربیتولین دار با یک قاعده مارن و ماسه سنگ قرمز به طور ناهمساز قرار می‌گیرد. بر روی کنگلومرای پالئوسن کرمان، ابتدا گدازه‌های تراکی آندزیت - آندزیت پورفیری مربوط به بخش زیرین سازند گرگاب و سپس واحد آندزیت - پورفیری مربوط به بخش فوقانی سازند گرگاب قرار می‌گیرد.

محدوده کانسار مسکنی در داخل واحد تراکی آندزیت - آندزیت زیرین قرار دارد که با مرز گسلیده شمال غرب - شمال شرق بر روی مجموعه دگرگونه درختک قرار داشته، خود با دو گسله تقریباً

فیزیکوشیمیایی سیالات کانه‌ساز است. در پایان، با استفاده از نتایج تجزیه‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های با سنگ میزبان شوشونیتی به روش XRF و اندازه‌گیری مقادیر عناصر Sr و Zr، U، Th، Pb، Zn، Cu، Ni، Co نمودارهای همبستگی این عناصر نسبت به هم ترسیم شده و نتایج آن تجزیه و تحلیل شد.

### مینرالوگرافی و پتروگرافی

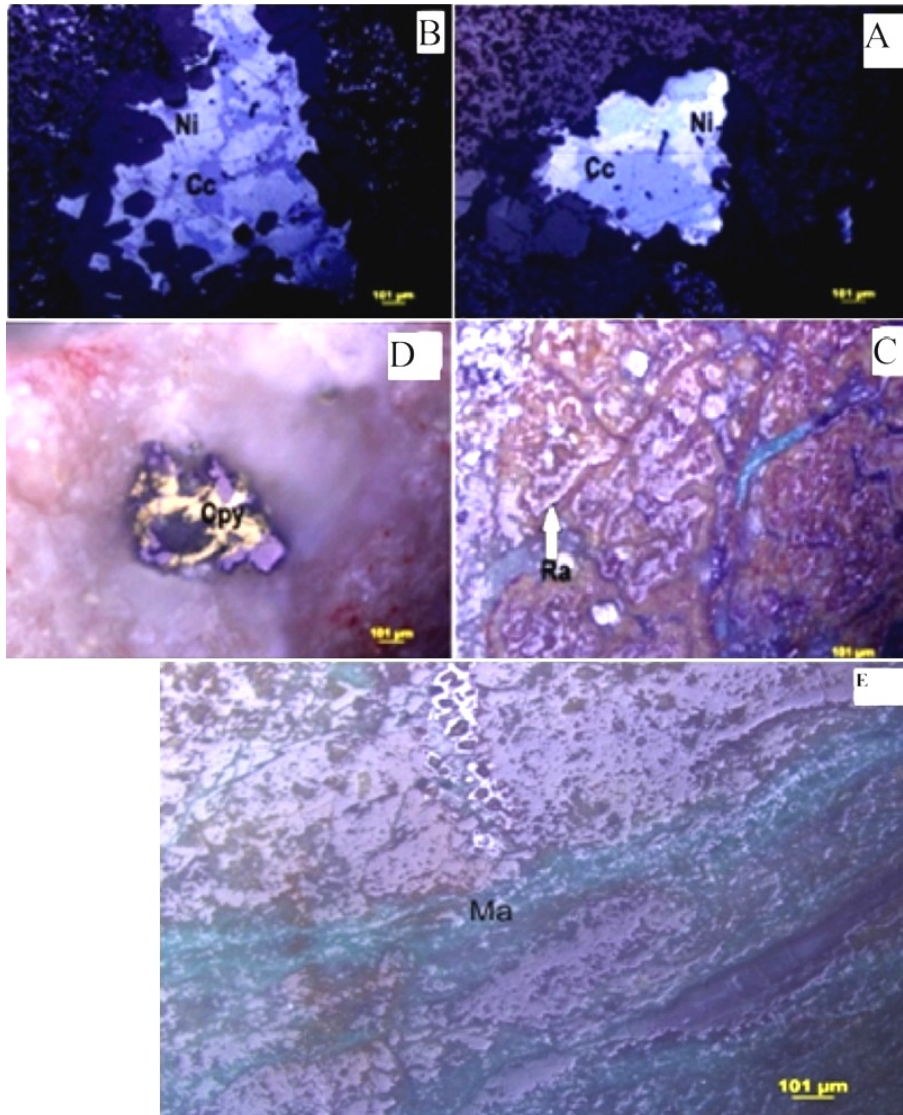
در مطالعات کانی‌شناسی بر روی مقاطع صیقلی و نازک صیقلی کانه‌های نیکلین (NiAs) و کالکوسیت ( $\text{Cu}_2\text{S}$ )، کالکوپیرییت ( $\text{CuFeS}_2$ )، راملزبرژیت ( $\text{NiAs}_2$ ) و مالاکیت ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ) (شکل ۳) مشاهده شد. در این مقاطع، همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، کانی کالکوسیت (شکل‌های ۳-A و ۳-B) تحت هجوم محلول‌های نیکل‌دار قرار گرفته و به این ترتیب در حال جانشین شدن با نیکلین است. کانه راملزبرژیت در اطراف نیکلین (شکل ۳-C) به صورت حاشیه‌ای است. بنابراین، می‌توان استنباط کرد که در این منطقه دو فاز کانه‌زایی رخ داده است: فاز اول مربوط به ولکانیسم آئوسن و به صورت سولفیدی شکافه پرکن و فاز دوم نیز مربوط به محلول‌های حاوی سیالات نیکل و آرسنیک‌دار است. بنابراین، کالکوسیت و کالکوپیرییت مربوط به فاز اول کانه‌زایی بوده و نیکلین و راملزبرژیت مربوط به فاز دوم کانه‌زایی هستند (شکل ۴). حضور راملزبرژیت به صورت کانه حاشیه‌ای در اطراف نیکلین نیز نشان‌دهنده پیشرفت ته‌نشین شدن نیکل و افزایش نسبت آرسنیک در محلول‌های کانه‌دار است.

ماگماتیسم و کانه‌زایی بسیار فعال بوده‌اند. بنابراین، احتمالاً حوضه‌های کششی ایجاد شده در محل برخورد برای مدت زمان طولانی قادر به بقا نبوده‌اند و مجاری بزرگ‌تر و منفرد که به انتقال ماگما و سیالات گرمایی همراه با یکدیگر منجر شده، به مجاری کوچک‌تر تبدیل می‌شوند. این مجاری کوچک تنها به عنوان مجرای برای به گردش در آوردن سیالات جوی عمل کرده که ماگما در آن تنها نقش یک موتور حرارتی را ایفا می‌کند. این پدیده به شکل‌گیری منطقه کانه‌زایی با چندین کانسار کوچک مشابه در محل برخورد دو خطواره در منطقه انارک منجر شده است.

یکی از مهم‌ترین ذخایر این منطقه تالمسی است که بررسی‌های Bagheri و همکاران (۲۰۰۷) نشان داد که کانه‌زایی در آن، در دو مرحله اصلی رخ داده است: اولین مرحله شامل کانه‌زایی سولفیدی شکافه پرکن و مربوط به ولکانیسم آئوسن است. در مرحله دوم با فاصله نسبتاً زیاد میوسن نسبت به مرحله اول، کانه‌های چند فاز آرسنیک نیکل، کبالت و اکسیدهای اورانیم تشکیل شده‌اند.

### روش انجام پژوهش

پس از نمونه‌برداری، برای انجام مطالعات میکروسکوپی، مینرالوگرافی کانه‌ها و سیالات درگیر، مقاطع دوبرصیقل، صیقلی، نازک صیقلی و نازک تهیه شد. مطالعات میکروترمومتری سیالات درگیر شامل دو بخش گرم کردن برای پی بردن به دمای همگن شدن یا دمای کانه‌سازی و سرد کردن برای پی بردن به درصد شوری و به این ترتیب پی بردن به خصوصیات



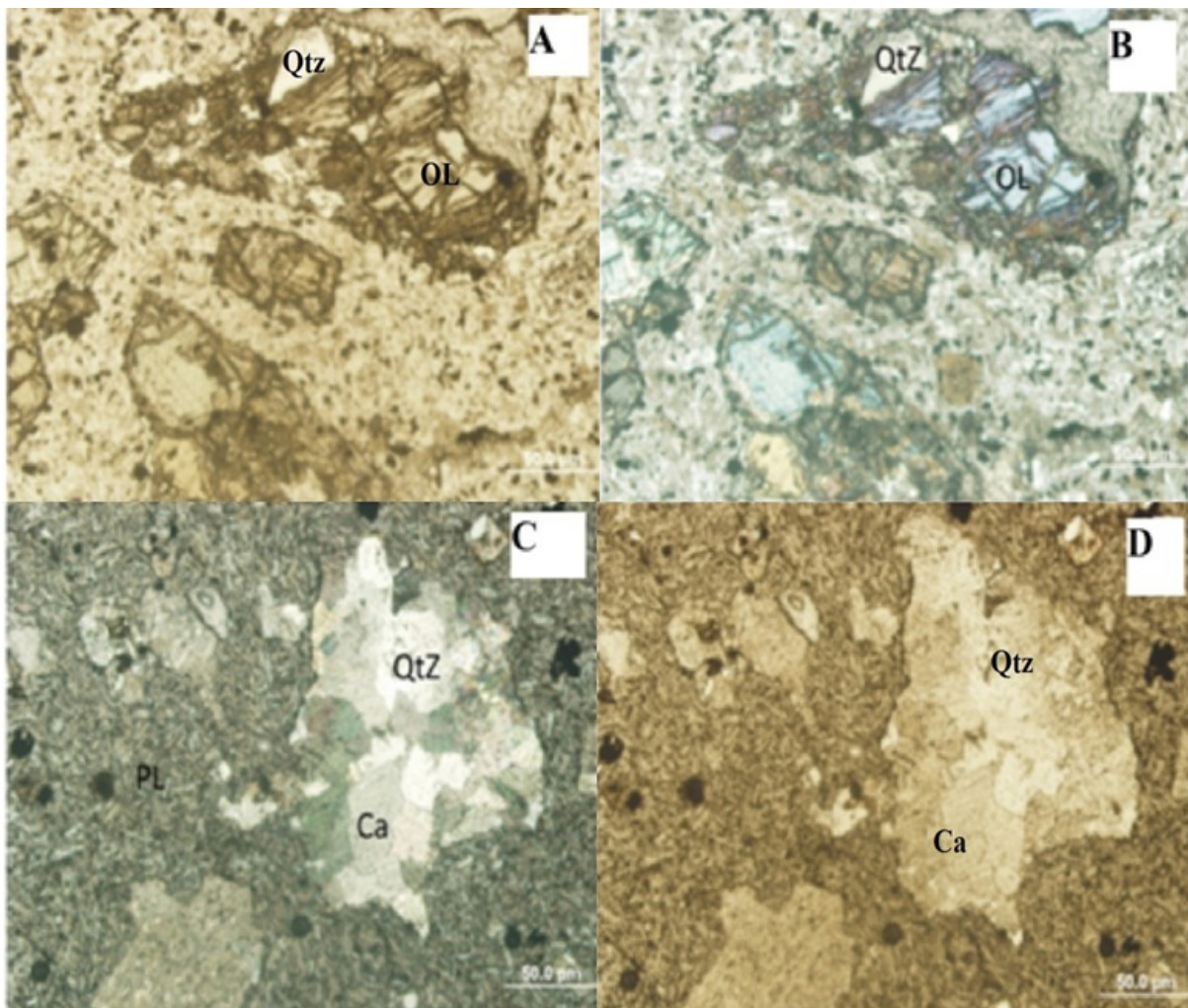
شکل ۳- A) کالکوسیت (Cc) که توسط نیکلین (Ni) احاطه شده است، B) کالکوسیت (Cc) که تحت هجوم محلول‌های نیکل‌دار قرار گرفته است. کالکوسیت مربوط به فاز اول و نیکلین مربوط به فاز دوم است، C) راملزبرژیت (Ra) در اطراف نیکلین مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده ته‌نشست نیکل و افزایش درصد آرسنیک در محلول‌های کانه‌دار است، D) کالکوپیریت (Cpy) و کالکوسیت در کنار هم دیده می‌شوند، E) ملاکیت (Ma) به فرمول  $Cu_2Co_3(OH)_2$ ، کربنات آبدار مس و کانی ثانویه معمول در زون اکسیدان است.

Mineral phase	First phase	Second phase	Weathering and Supergene Enrichment
Chalcopyrite	██████████		
Chalcocite	██████████	-----	██████████
Nickeline		██████████	
Rammelsbergite		██████████	
Malachite			██████████
Uraninite		-----	-----
Quartz	██████████	-----	██████████
Calcite	-----	██████████	-----

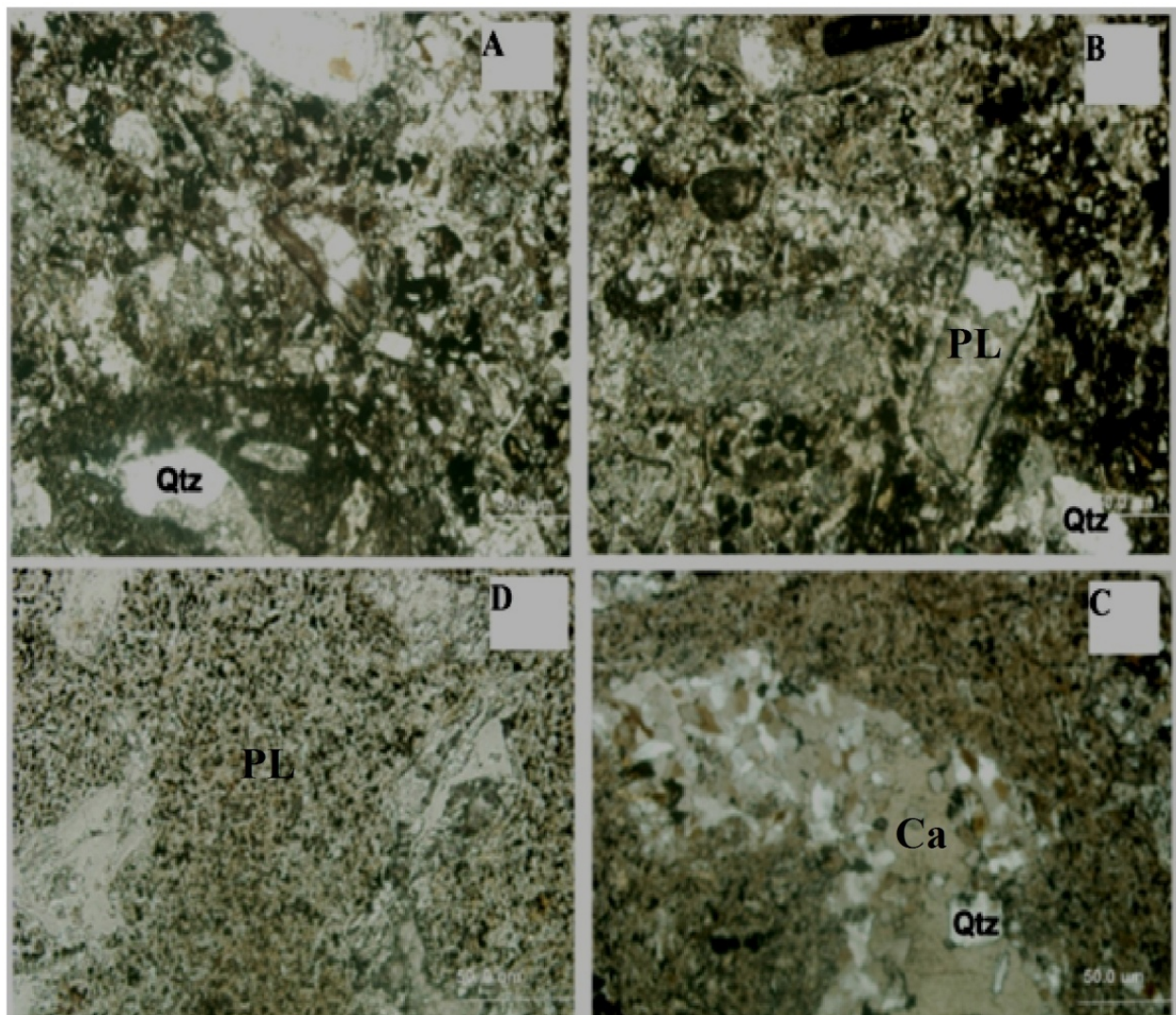
شکل ۴- توالی پاراژنتیکی مجموعه کانی‌های مطالعه شده

جهت هستند (شکل ۵). در این مقاطع کلینوپیروکسن‌ها سالم و الیون‌ها دگرسان شده‌اند که باز هم گویای سنگ آندزیت تا آندزیت بازالت است. الیون‌ها توسط کلسیت و کوارتز جایگزین شده‌اند. الیون‌ها را می‌توان بقایای فاز آتشفشانی اولیه و کلسیت و کوارتز را حاصل دگرسانی الیون توسط محلول‌های گرمابی دانست که البته، بیشتر قالب دگرسان شده الیون و حفره‌های ایجاد شده را جانشین نموده‌اند. به‌طور کلی، دو مرحله دگرسانی را می‌توان تشخیص داد؛ به‌طوری که ابتدا سیلیس ته‌نشین شده و بعد کلسیت حفره‌ها را پر کرده است (شکل ۶).

بررسی مقاطع نازک تهیه شده از مغزه‌های موجود در منطقه بیانگر سنگ میزبان آندزیتی است. در زمینه سنگ‌ها بیشتر کانی پلاژیوکلاز قابل مشاهده است. دگرسانی کربناته و سیلیسی شدن به شکل جانشینی و رگچه‌ای قابل مشاهده است. در این مقاطع، برش چند منشایی ولکانیکی کربناته و دگرسان شده دیده می‌شود که قطعات ولکانیک بعضاً کلریتی شده‌اند. بافت غالب موجود در مقاطع نازک بافت آمیگدالوئیدال است که در واقع، حفره‌ها با کلسیت و کوارتز پر شده و سنگ اصلی آندزیت تا آندزیت‌بازالت با بافت جریان‌ی (فلوئیدال) است که میکروولیت‌ها (پلاژیوکلاز) در زمینه سنگ دارای یک



شکل ۵- (A) الیون که در حال جانشینی با کوارتز و کلسیت است (بدون آنالیزور)، (B) با آنالیزور، (C) حفره‌ای در میان میکروولیت‌های پلاژیوکلاز جهت‌دار که با کلسیت و کوارتز پر شده است (بافت حفره‌ای) (با آنالیزور)، (D) بدون آنالیزور.



شکل ۶- A و B) ولکانیک برشی پلی ژنیک کربناته شده و سیلیسی شده، C) دو نوع دگرسانی سیلیسی و کربناته شدن، ابتدا سیلیسی ته‌نشست شده و بعد کلسیت حفره را پر نموده است، D) آندزیت بازال با بافت جریان‌ی کربناته و سیلیسی شده میکرولیت‌های ریز دارای بافت پورفیری جریان‌ی

### مطالعه سیالات درگیر

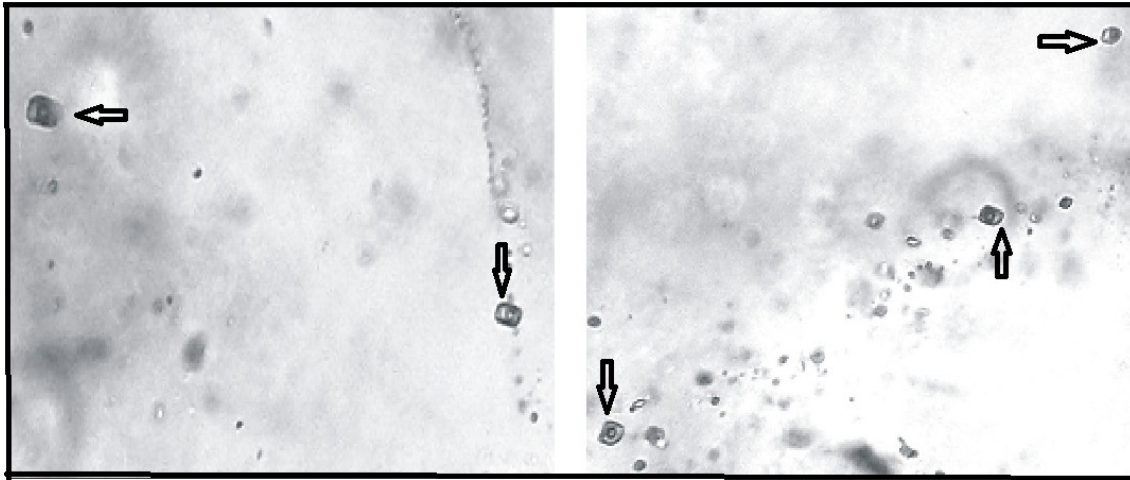
پس از نمونه‌برداری از رگه‌های کانه‌دار با قطر حدود ۱۰ تا ۴۰ سانتی متر و امتداد شمال غربی - شمال شرقی مقاطع دوبر صیقل به‌منظور مطالعه سیالات درگیر تهیه شد. نوع سیالات درگیر کانسار مسکنی بر اساس دسته‌بندی Shepherd و همکاران (۱۹۸۵) بیشتر جزو سیالات درگیر دو فاز غنی از مایع (L + V) هستند.

سیالات درگیر منطقه را از لحاظ شکل ظاهری

(مورفولوژیکی) می‌توان به‌صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

- ۱- سیالات درگیر دارای شکل نامنظم؛
  - ۲- سیالات درگیر کروی شکل؛
  - ۳- سیالات درگیر کشیده و باریک.
- سیالات درگیر از نظر اندازه بسیار ریز و بیشتر بین ۳-۷ میکرون هستند.





شکل ۷- سیالات درگیر اولیه با اندازه ۷-۳ میکرون که با فلش نشان داده شده‌اند.

#### (الف) رده‌بندی ژنتیکی سیالات درگیر:

بر مبنای نحوه زایش یا زمان به تله افتادن سیال، سه نوع سیال درگیر از دیدگاه ژنتیکی شناسایی شده‌اند که به رده‌بندی پاراژنتیکی نیز معروف است و شامل سیالات درگیر اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب هستند (Shepherd *et al.*, 1985; Pirajno, 2009). سیالات درگیر اولیه در صورتی به وجود می‌آیند که بی‌نظمی همزمان با رشد بلور آغاز و با ادامه رشد آن بسته شود که بیشتر سیالات درگیر انتخاب شده برای مطالعه در این تحقیق از نوع اولیه‌اند (شکل‌های ۷-الف و ب).

سیالات درگیر ثانویه، پس از پایان تبلور کانی میزبان شکل می‌گیرند و زمانی ایجاد می‌شوند که پس از رشد بلور، به هر دلیلی در آن شکستگی ایجاد شود و محلول‌های بعدی در این شکستگی به دام افتند. این سیالات فقط داده‌هایی را در مورد مراحل بعدی فعالیت‌های گرمایی به دست می‌دهند. سیالات درگیر ثانویه کاذب زمانی به وجود می‌آیند که همزمان با رشد بلور و پیش از کامل شدن رشد بلور در آن شکستگی ایجاد شود (Pirajno, 2009).

#### (ب) میکروترمومتری سیالات درگیر:

مطالعات میکروترمومتری در آزمایشگاه سیالات درگیر دانشگاه اصفهان با استفاده از یک دستگاه میکروسکوپ زایس (ZEISS) و به وسیله دستگاه Linkam مدل THM600 با کنترل کننده حرارتی TMS94 و سرد کننده LNP که بر روی میکروسکوپ زایس نصب شده، انجام پذیرفت. همان طور که گفته شد، مطالعات میکروترمومتری شامل دو بخش گرم کردن و سرد کردن است. مرحله اول برای به دست آوردن دمای همگن شدن یا دمای کانه‌سازی است که در این مرحله سیال درگیر آن قدر حرارت داده می‌شود تا همه فازهای آن به یک فاز اصلی همگن شود که به آن دمای همگن شدن ( $T_H$ ) گفته می‌شود. در آزمایش انجامد، سیال درگیر سرد می‌شود تا فاز مایع آن به فاز جامد تبدیل شود. پس از سرد کردن، دوباره نمونه گرم می‌شود تا جایی که آخرین بلور یخ ذوب شود. دمایی که در آن آخرین بلور یخ ذوب می‌شود، به دمای ذوب آخرین قطعه یخ ( $T_{Lm}$ ) معروف است که این عمل را

برای غلبه بر مقاومت ذاتی محلول در مقابل انجماد انجام می‌دهند. مقدار شوری با استفاده از نمودارها و جدول‌هایی که به وسیله Shepherd و همکاران (۱۹۸۵) ارائه شده، قابل اندازه‌گیری است. در این آزمایش، نمونه‌ها تا سقف ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند (جدول ۱) و همه سیالات مورد مطالعه طی گرم کردن به فاز مایع همگن شدند.

با توجه به همگن شدن همه سیالات درگیر مورد مطالعه به فاز مایع، می‌توان نتیجه گرفت که پدیده جوشش رخ نداده یا حداقل در نمونه‌های مورد مطالعه دیده نشده است. تنها در دو مورد دمای همگن شدن به بیش از ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد رسید (جدول ۲) که احتمالاً حاصل پدیده نشت و قابل نظر کردن است.

جدول ۱- مربوط به نمونه کلسیت و کوارتز ایستگاه ۱ (نوع فازها = L+V؛ نوع همگن شدن = به مایع؛ نوع میانبار = اولیه)

تعداد	دمای انجماد ( $T_f$ )	دمای ذوب نهایی ( $T_{im}$ )	دمای همگن شدن ( $T_H$ )	درصد شوری	توضیحات
1	-42	-2.2	243.0	2.5	انجماد با ناپدید شدن حباب همراه بود
1	-	-2.2	146.0	2.5	-
1	-	-2.2	140.0	2.5	-
1	-	-1.6	144.5	2.0	-
1	-	-1.6	144.9	2.0	-
1	-	-2.0	267.0	2.2	کوارتز
1	-	-1.8	267.0	2.1	کوارتز
1	-	-2.0	265.0	2.2	-

جدول ۲- مربوط به نمونه کلسیت ایستگاه ۲ (نوع فازها = L+V؛ نوع همگن شدن = به مایع؛ نوع میانبار = اولیه)

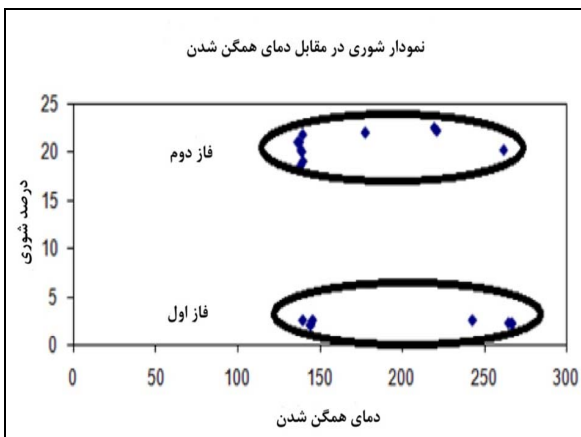
تعداد	دمای انجماد ( $T_f$ )	دمای ذوب اولیه ( $T_{im}$ )	دمای ذوب نهایی ( $T_{im}$ )	دمای همگن شدن ( $T_H$ )	درصد شوری	توضیحات
1	-53	-46	-15.3	139.5	20.0	-
1	-55	-47	-15.5	139.0	20.2	-
2	-	-	-15.0	140.2	19.0	-
3	-	-	-16.0	138.0	21.0	-
1	-	-	-14.8	138.5	18.5	-
1	-70	-46	-18.0	178.0	22.0	-
1	-	-	-17.5	140.0	21.8	-
1	-	-	-18.5	220.0	22.5	-
1	-	-	-17.8	221.5	22.2	-
1	-	-	-	135.0	-	-
1	-	-	-	137.0	-	-
1	-	-	-16.0	137.0	21.0	-
1	-	-	-15.5	262.0	20.2	-
2	-	-	-	بیش از 320	-	احتمالاً حاصل پدیده نشت است

در شکل ۹ نمودار فراوانی دمای همگن شدن نمونه‌ها به نمایش در آمده و بیانگر آن است که حدود ۷۰ درصد نمونه‌ها در ایستگاه شماره ۲ و حدود ۵۰ درصد نمونه‌ها در ایستگاه ۱ دارای دمای همگن شدن ۱۵۰ - ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد هستند. شکل

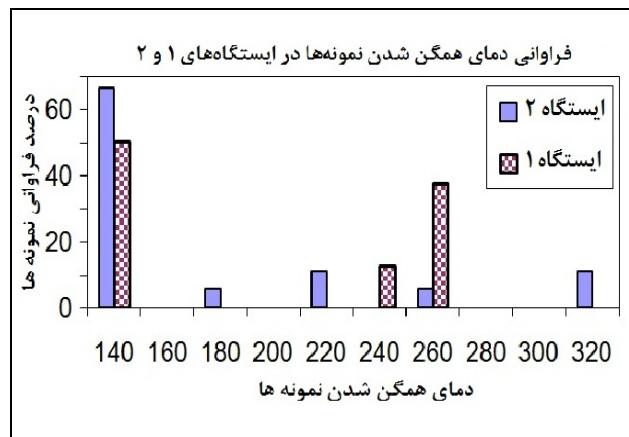
۱۰ بیانگر حداقل دو محدوده پراکندگی کاملاً مشخص برای دمای همگن شدن در مقابل درصد شوری سیالات درگیر است که در شکل با عنوان فاز اول و فاز دوم به نمایش در آمده است. نمودار دمای همگن شدن - شوری به همراه خطوط کنتوری با چگالی ثابت، نموداری است که می‌توان

با توجه به سه محدوده چگالی که در بالا ذکر شد، دمای همگن شدن ۱۵۰ - ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد و همین‌طور، دمای همگن شدن ۲۶۷ - ۲۴۳ درجه سانتی‌گراد تقریباً سه محدوده فشاری به‌صورت: دو محدوده کمتر از ۵۰ بار و یک محدوده در حدود ۵۰ بار به‌دست می‌آید (شکل ۱۱).

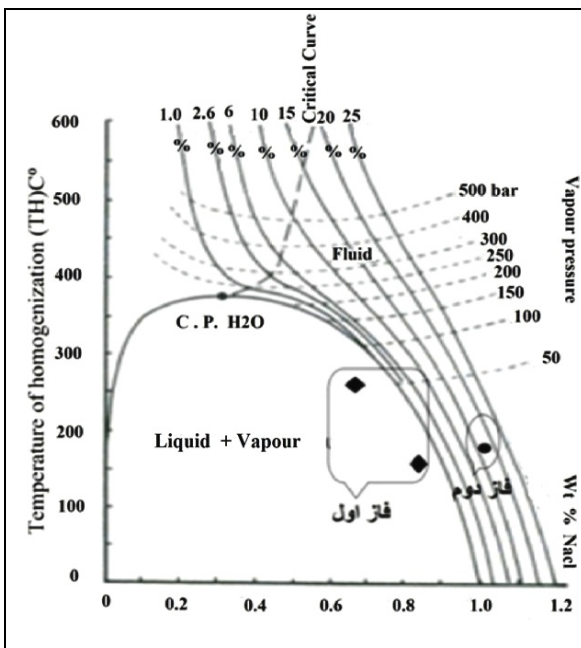
توسط آن چگالی سیال را تعیین کرد (Bodnar, 1983). طبق این نمودار چگالی سیالات درگیر در محدوده ۰/۷ - ۰/۸ و ۰/۹ - ۱، ۱-۱/۱ محاسبه می‌گردد (شکل ۱۱). در صورت در اختیار داشتن شوری سیال و چگالی، می‌توان میزان فشار را محاسبه نمود.



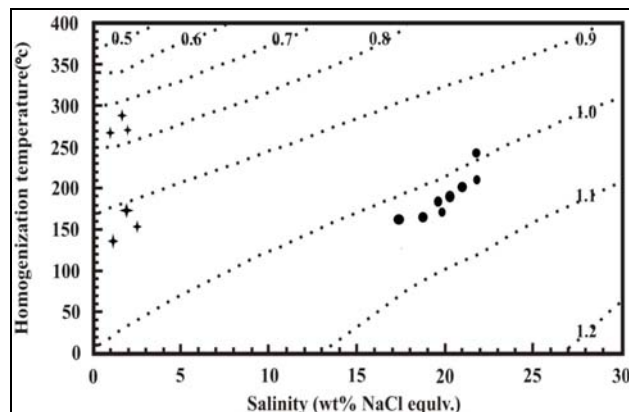
شکل ۹- نمودار پراکندگی دمای همگن شدن در برابر درصد شوری



شکل ۸- فراوانی دمای همگن شدن نمونه‌ها در ایستگاه‌های ۱ و ۲



شکل ۱۱- نمودار دما-چگالی برای تعیین مقدار فشار با توجه به شوری



شکل ۱۰- چگالی میانبرهای مورد مطالعه بر حسب  $\text{g.cm}^{-3}$  (نمودار اقتباسی از Bodnar, ۱۹۸۳)

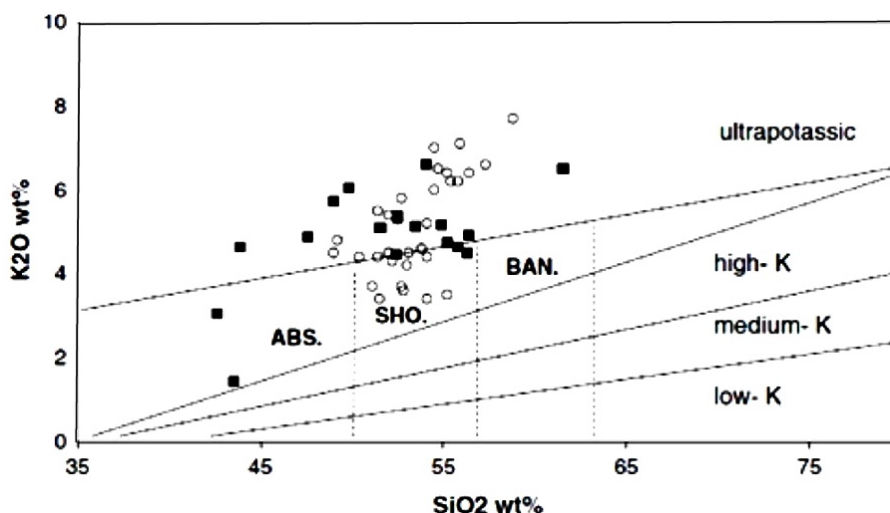
## ژئوشیمی

نمونه‌های مطالعه شده از سنگ‌های آتشفشانی محدوده تالمسی و مسکنی ماهیت آکالن داشته، دارای ترکیب شوشونیتی - اولتراپتاسیک هستند (شکل ۱۲). بهترین تعریف برای آن‌ها ماگمای شوشونیتی است که با ولکانیسم حاشیه قاره‌ای و فرایندهای فرورانش مرتبط است (Jung *et al.*, 1976)، اخیراً، آبساروکیت و توسکانیت در ۵ کیلومتری شمال معدن تالمسی (احمدی، ۱۳۸۱) تعیین شده‌اند.

سنگ‌های پتاسیک منطقه از لحاظ  $K_2O$  بیش از ۶/۵ درصد وزنی،  $MgO$  بیش از ۴/۴ درصد وزنی،  $Al_2O_3$  بیش از ۱۶/۲ درصد وزنی غنی هستند و از نظر

میزان  $TiO_2$  (بیش از ۰/۹) فقیر هستند و میزان نسبت  $K_2O/Al_2O_3$  در آن‌ها پایین است (کمتر از ۰/۵). ترکیب آن‌ها معمولاً از سیلیس غیر اشباع تا مقادیر  $SiO_2$  متوسط تغییر می‌کند، اما در تعداد کمی از نمونه‌ها  $SiO_2$  متجاوز از ۶۱ درصد وزنی است.

مقادیر بالای الیوین و همچنین آلبیت و ارتوکلاز نورماتیو در برخی نمونه‌ها، بیانگر الیوین - آکالن بازالت به عنوان ماگمای اولیه است (Muller and Groves, 1997). سنگ‌های کمان ماگمایی همراه با شوشونیت است که از طریق ذوب بخشی پوسته اقیانوسی فلوگوپیت‌دار در عمق ۱۲۰ کیلومتری تشکیل شده است (Muller and Groves, 1997).



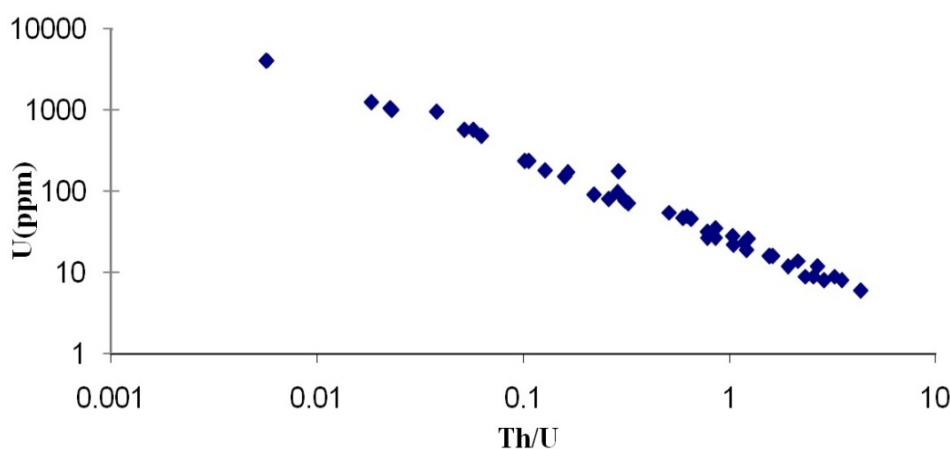
شکل ۱۲- دیاگرام  $K_2O - SiO_2$  سنگ‌های آتشفشانی منطقه تالمسی و مسکنی (ABS = آبساروکیت، SHO = شوشونیت، BAN = باناکیت). برگرفته از Foley و همکاران (۱۹۸۷) و Le Maitre (۱۹۸۹) (مربع = مطالعات جدید (Bagheri *et al.*, 2007)، دایره = مطالعات Tarkian و همکاران، ۱۹۸۳)

ماکزیمم ۲۱۱ ppm توسط Tarkian و همکاران (۱۹۸۳) در یک باناکیت تازه که حاوی دانه‌های ریز مس خالص است گزارش شده است. مقدار میانگین اورانیم حدود ۲/۳ ppm بوده و در برخی موارد به بیش از ۱۶ ppm نیز می‌رسد، اما انطباق خاصی بین این

مقدار مس، نیکل، کبالت و اورانیم جالب توجه است. نیکل (میانگین ۴۲ ppm) در مقادیر مرتبط با آندزیت‌های کالک‌آکالن منطقه اردستان است (Tarkian, 1972). مقدار ماکزیمم مس حدود ۱۰۹ ppm و دارای میانگین ۳۱ ppm است. هرچند مقدار

شده است). نتایج حاصل از پردازش داده‌ها بیانگر حضور بی‌هنجاری مس، نیکل، کبالت و اورانیوم در محدوده کانسار است ضمن آنکه تغییرات روی، سرب، توریم، اورانیوم، زیرکونیم و استرانسیم نیز بررسی شد. منحنی‌های همبستگی کبالت و اورانیوم، نیکل و اورانیوم، مس و اورانیوم، کبالت و نیکل، نیکل و مس و در نهایت کبالت و مس به عنوان عناصر با اهمیت در شکل ۱۴ ترسیم شده‌اند. برای محاسبه مقدار همبستگی این عناصر نسبت به هم، از فرمول همبستگی موجود در بخش محاسبات آماری نرم افزار Excel استفاده شد. همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است، همبستگی بین کبالت و نیکل، مس و اورانیوم بیش از بقیه است. نکته جالب توجه، همبستگی نسبتاً بالای اورانیوم و نیکل است. این دو عنصر در سیستم‌های ماگمایی رفتاری کاملاً متفاوت دارند، اما در سیستم‌های گرمایی بدون ارتباط با ماگماتیسم (مثلاً شورابه‌های حوضه‌ای) می‌توانند گاه هر دو از سنگ‌های اطراف شسته، در مناطق مناسب مجدداً نهشته شوند. به همین دلیل، همبستگی بالای آن‌ها می‌تواند به‌خاطر ته‌نشست آن‌ها به‌طور تقریباً همزمان در مرحله دوم کانه‌زایی باشد.

مقادیر و  $K_2O$  و  $SiO_2$  سنگ‌ها وجود ندارد. در اکثر نمونه‌ها با میزان بالای اورانیوم (بیش از ۶ ppm) نسبت  $Th/U$  کمتر از ۱ است (شکل ۱۳). همان‌طور که توسط (Ruzicka, 1990) مشخص شده، میزان  $Th/U$  در شرایط دمایی بالا و ماگمایی حدود ۵/۱ است، ولی فرآیندهای گرمایی و رسوبی باعث جدایش  $Th$  از  $U$  در سیالات می‌شود که باعث تشکیل کانسارهای رگه‌ای و اپی ژنتیک در دماهای زیر ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و با نسبت  $Th/U$  کمتر از ۱ می‌شود. بنابراین، میزان بالای اورانیوم در این سنگ‌ها در ارتباط با تفریق ماگمایی نیست. مقداری از اورانیوم که احتمالاً به درون سنگ میزبان مهاجرت کرده، می‌تواند در ارتباط با محلول‌های گرمایی اورانیوم‌دار باشد. برخلاف نمونه‌های رگه‌ای، هیچ انطباقی بین تغییرات  $U$ ،  $Cu$  و  $Ni$  در نمونه‌های سنگ میزبان وجود ندارد. عدم انطباق، از جمله ویژگی‌های شاخص شوشونیت‌ها و آندزیت‌هاست که نشان می‌دهد این عناصر از سنگ میزبان منشأ نگرفته‌اند. نمونه‌برداری ژئوشیمیایی به‌منظور بررسی تغییرات عناصر جزئی در کانسار مسکنی در مقیاس ۱/۵۰۰۰ و از رگه‌های موجود صورت پذیرفت (نتایج تجزیه نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه



شکل ۱۳- نمودار پراکندگی  $Th/U$  نسبت به  $U$

جدول ۳- نتایج تجزیه نمونه‌های با سنگ میزبان شوشونیتی به روش XRF

	Co	Ni	Cu	Zn	pb	Th	U	Zr	Sr	
10056	350	172	4368	59	33	30	578	221	531	
10057	1440	10438	9031	90	36	36	951	211	445	
10058	60	170	3803	67	29	23	27	147	402	
10059	100	158	7954	70	27	23	1255	221	571	
10060	30	55	1687	40	30	30	46	174	279	
10061	360	961	8059	69	34	33	578	200	361	
10062	60	68	785	67	26	23	8	198	339	
10063	70	85	2200	55	29	24	151	211	446	
10064	30	52	853	38	26	31	50	196	174	
10065	110	129	2246	41	24	28	55	205	228	
10066	30	25	244	52	31	25	16	169	486	
10067	30	22	944	54	34	32	12	213	603	
10068	40	46	5155	53	28	29	28	202	596	
10069	50	40	7436	63	29	23	22	173	493	
10070	40	39	2138	43	29	28	171	178	467	
10071	50	89	7369	66	28	24	1065	180	446	
10072	40	48	10716	62	36	23	180	209	330	
10073	70	62	21452	143	23	23	19	185	411	
10074	80	116	82559	207	32	21	81	148	441	
10075	30	46	2405	65	27	30	35	227	561	
10076	90	158	38420	156	29	23	71	170	387	
10077	40	61	9886	84	27	24	77	179	534	
10078	80	114	38328	164	29	30	479	188	422	
10079	150	99	6011	49	65	28	98	201	567	
10080	60	207	6414	77	30	25	236	191	443	
10081	30	62	1672	63	25	28	47	198	310	
10082	50	75	2842	70	23	21	27	183	375	
10083	60	112	7573	89	24	20	91	131	413	
10084	210	483	6364	68	23	24	236	186	307	
10085	160	3998	32203	186	22	23	4062	170	823	
10086	50	56	1479	83	25	23	12	199	500	
10087	1080	1547	11001	139	17	23	999	152	295	
10088	70	58	39510	174	15	8	0	163	6493	
10089	80	112	72712	238	33	51	176	179	432	
10090	60	57	5310	86	15	25	32	175	219	
10091	70	58	5284	95	24	27	23	213	401	
10092	60	58	468	104	24	21	9	199	471	
10093	50	43	256	82	35	23	9	222	634	
10094	60	56	13564	104	30	25	16	156	394	
10095	40	21	1097	78	58	26	16	218	869	
10096	30	14	591	78	39	28	8	228	548	
10097	30	16	917	63	35	32	26	216	632	
10098	40	25	477	107	39	30	14	218	747	
10099	40	16	1046	70	45	29	9	240	932	
10100	30	19	549	64	44	26	6	210	994	



## بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده برای دمای همگن شدن و درصد شوری، منشأ سیالات کانه‌ساز دارای حداقل دو منشأ متفاوت، یا دو مرحله اصلی کانی‌زایی جداگانه (فاز اول و فاز دوم) است. احتمالاً آن دسته از سیالات که تقریباً دارای دمای بالاتر - شوری پایین‌تر هستند، بیانگر سیال کانه‌ساز با منشأ ولکانیکی، دسته دیگر که تقریباً دارای دمای پایین‌تر - شوری بالاتر هستند، بیانگر سیال کانه‌ساز با منشأ شورابه‌های حوضه‌ای است. البته، احتمال اختلاط با آب‌های جوی در هنگام نهشت کانه‌ها را نیز باید مورد توجه قرار داد.

مطالعات مینرالوگرافی حاکی از حداقل دو مرحله کانه‌زایی است که در شکل‌های A-۳ و B-۳ نیز دیده می‌شود. کالکوسیت به فاز اول کانه‌زایی و شکافه پرکن و به ولکانیسم ائوسن و نیکلین که در این اشکال در حال جانشین کردن کالکوسیت است به محلول‌های نیکل، آرسنیک، کبالت و اورانیم‌دار مربوط مرحله دوم کانه‌زایی مربوط است. مطالعات کانی‌شناسی مقاطع نازک نیز حاکی از سنگ در برگیرنده آندزیتی پتاسیم بالا (شوشونیت) است، کربناتی و سیلیسی شدن نیز به دگرسانی ثانویه و هجوم سیالات مربوط است. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که حداقل دو گروه از سیالات درگیر با شوری مجزا قابل تشخیص هستند.

همان‌طور که در مقادیر بالا نیز کاملاً مشخص است و با توجه به شکل ۱۴، همبستگی کبالت و اورانیم و نیکل و اورانیم و مس و اورانیم نسبتاً بالاست و با توجه به پایین بودن همبستگی بین نیکل و مس، کبالت و مس و همین‌طور، همبستگی بالای کبالت و نیکل نسبت به یکدیگر

می‌توان این‌طور استنباط کرد که کبالت و نیکل به فاز کانه‌زایی مجزا از مس مربوط هستند (مراجعه شود به داده‌های تجزیه نمونه‌ها به روش XRF در جدول ۳).

با توجه به همبستگی نسبی مس با اورانیم می‌توان دو حالت را فرض نمود. با در نظر گرفتن این نکته که اورانیم در حالت اکسیدان محلول و در حالت احیا ته نشست می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که شرایط احیایی به وجود آمده توسط سولفیدهای مس باعث ته نشست اورانیم شده است، یا آنکه مس و اورانیم به صورت کمپلکس کربناته به محیط حمل شده‌اند (Bagheri, 2009). از طرفی، نسبت Th/U کمتر از ۱ بیانگر رفتار متضاد Th و U در سنگ‌های رسوبی و آذرین است و نشان‌دهنده منشأ جوی و شورابه‌های حوضه‌ای اورانیم است (شکل ۱۳)؛ به این معنا که اورانیم موجود، از سنگ میزبان منشأ نگرفته است (McLennan and Taylor 1979).

داده‌ها (جدول ۳) گویای آن است که کبالت با نیکل بیشترین و با مس کمترین همبستگی را نشان می‌دهد. همبستگی‌های منفی در موارد بالا چشم‌گیر نبوده، در واقع اصلاً وجود ندارد، اما در کل، همبستگی منفی با میزان قابل توجه بین دو عنصر نشان‌دهنده آن است که با ورود یکی از آن دو عنصر به محیط، دیگری از آن خارج می‌شود که این نتیجه با مطالعات صورت گرفته توسط سیالات درگیر و مطالعات مینرالوگرافی توسط نگارنده، مبنی بر عملکرد چندین فاز کانه‌زایی مجزا و با شرایط ژئوشیمیایی متفاوت در کانسار مسکنی همخوانی دارد.



## منابع

- احمدی، م. (۱۳۸۱) مطالعه زمین‌شناسی و پترولوژی مجموعه شوشونیتی شمال معدن تالمسی، غرب انارک (شمال شرق استان اصفهان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ایران.
- باقری، س. (۱۳۷۲) زمین‌شناسی و پترولوژی افیولیت منطقه انارک (ایران مرکزی). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ایران.
- خویی، ن.، قربانی، م. و تاجبخش، پ. (۱۳۸۷) کانسارهای مس در ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.
- Bagheri, H., Moore, F. and Alderton, D.H.M. (2007) Cu–Ni–Co–As (U) mineralization in the Anarak area of Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 29: 651 – 665.
- Bagheri, H. (2009) Rare earth and trace element mobility by CO<sub>2</sub> bearing fluids in five-element deposits of the Anarak area, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 101:3.
- Bodnar, R. (1983) A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluid. *Economic Geology* 78: 535-542.
- Foley, S. F., Venturelli, G., Green, T. H. and Toscani, L. (1987) The ultrapotassic rocks: characteristics, classification and constraints for petrogenetic models. *Earth Science Review* 24: 81 – 134.
- Jung, D. and kursten, M. (1976) Post Mesozoic volcanism in Iran and its relation to the subduction of the Afro – Arabian under the Eurasian plate. In: In: A., Pilger and A., Rosler (Eds.): *Afar – between continental and oceanic rifting*. Schweizerbartsche Veriagbuchhandlung Stuttgart 16: 175 – 181.
- Le Maitre, R.W. (1989) *A classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms (IUGS): Recommendations of the IUGS subcommission on the systematic of Igneous Rocks*. Blackwell, Oxford.
- McLennan, S. M. and Taylor, S. R. (1979) Rare earth element mobility associated with uranium mineralization. *Research School of Earth Science of Australia* 282: 247 – 249.
- Muller, D. and Groves, D. L. (1997) Potassic igneous rocks and associated gold – copper mineralization. *Lecture Notes Earth Science* 56: 238 – 246.
- Romanko, E., Kokorin, Yu., Krivyakin, B., Susov, M., Morozov, I. and Sharkovski, M. (1984) Outline of metallogeny of Anarak area (Central Iran). *Technoexport Report* 19: 187 - 207.
- Ruzicka, V. (1990) vein uranium deposits. *Ore Geology Review* 8: 247 – 276.
- Sarcia, J. and Sarcia, J. (1960) Indices uranifères dans la région d, Anarak (plateau central Iran). *compte Rendu Sommaire des séances de la société géologique de France* 4: 76 – 78.
- Shepherd, T., Rankin, A. H. and Alderton, D. H. M. (1985) *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Chapman & Hall Publisher, New York.
- Tarkian, M. (1972) *Geologie, petrography und geochemie der magmatite sudlich von Ardestan (zentral Iran)*, Dissertation Universität, Hamburg.
- Tarkian, M., Bock, W. D. and Numann, M. (1983) Geology and mineralogy of the Cu – Ni – Co – U ore deposits at Talmessi and Meskani, central Iran. *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 32: 111 – 133.



## Geochemical, mineralogical and fluid inclusion studies of Cu, Ni, Co and U of Meskani ore deposit, Anarak (Central Iran)

Bahman Mokhtarzadeh Mohammadi and Hashem Bagheri \*

Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

### Abstract

The Meskani ore deposit is located in the Central Iran and Anarak-Khur metamorphic area. Microscopic studies were conducted on polished, thin polished and double polished thin sections of quartz and calcite minerals from ore bearing veins. Chalcocite, Nickeline, Chalcopyrite, Rammelsbergite and Malachite were recognized which Nickeline is surrounded by Rammelsbergite representing deposition of nickel and increasing of arsenide in ore bearing solutions. Most of the studied fluid inclusions are from liquid rich two phases (L + V) type. Genetically, primary types were selected for this study. Based on freezing studies, calculated temperature of last melting point ( $T_{lm}$ ) is from -1.6 to -18.5 °C that is equal to 2-22.5 % wt eq. NaCl. Heating studies, have revealed a homogenization temperature ( $T_H$ ) range of 130-160 °C. Homogenization temperature - salinity binary plots show two distinct fluids that can represent two different phases of mineralization or two distinct different sources of ore bearing fluids. Probably one of them represents volcanogenic ore bearing fluid and the other represents basinal brine ore bearing solution. The geochemical analysis of collected samples from different parts of Meskani ore deposit, elements including Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Th, U, Zr and Sr were determined among of them Co, Cu, Ni and U are the most important. Scatter diagrams of these elements were plotted and their correlations determined. Results of these analyses revealed that the average of U, Th, Ni, Cu are 269, 26, 452, 10786 ppm, respectively. Another interesting feature is the inverse correlation between U content and Th/U ratio. This feature represents that high U content in these rocks is not related to magmatic differentiation. In contrast of vein samples, there is not any correlation between U, Cu and Ni changes in country rock samples. This is one of the specific characteristics of shoshonites and andesites that represent these elements have not been originated from country rocks. The geochemical and petrographical studies have shown that country rocks are mainly shoshonitic in composition.

**Key words:** Meskani ore deposit, Fluid inclusion, Anarak-Khur metamorphic area, Geochemistry

---

\* h.bagheri@geol.ui.ac.ir