مجله زمین‌شناسی اقتصادی
سال ۱۳۹۰، شماره ۲، (جلد ۳)
صفحه ۱۹۳ تا ۲۱۶

Journal of Economic Geology
2011- 2012, No. 2 (Vol. 3)
ISSN 2008-7306

معدن فیروزه نیشابور: نخستین کانی‌سازی مس- طلا- اورانیم- عناصر نادر خاکی سبک نوع IOCG در ایران

محمدحسن کریم‌پور*، آزاده ملک‌زاده شفارودی، اکبر اسفندیارپور و حسن محمدنژاد

گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ص.پ: ۱۴۳۶-۹۱۷۷۵، مشهد، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۲/۲، پذیرش: ۱۳۹۰/۴/۲۷

چکیده

معدن فیروزه نیشابور در شمال‌غرب نیشابور و در کمربند آتشفشانی جنوب قوچان واقع شده است. مهمترین واحدهای سنگی منطقه شامل گدازه و پیروکلاستیک‌های آندزیتی - داسیتی با سن ائوسن هستند. توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق با ترکیب دیوریت پورفیری تا سینیت پورفیری (گرانیتوئیدهای سری مگنتیت) در آن نفوذ کرده‌اند. آلتراسیون وسیعی واحدهای آتشفشانی و نفوذی منطقه را تحت تأثیر قرار داده است که شامل چهار زون اصلی سیلیسی، آرژیلیک، کربناتی و پروپلیتیک می‌باشد. زون سیلیسی و بعد آرژیلیک، آلتراسیون‌های اصلی منطقه هستند. کانی‌سازی به شکلهای افشان، استوک‌ورک و برش هیدروترمالی دیده می‌شود. کانه‌های اولیه شامل پیریت، مگنتیت، اسپکیولاریت، کالکوپیریت و بورنیت است. کانه‌های ثانویه شامل فیروزه، کالکوزیت، کوولیت و اکسیدهای آهن است. زون گوسان وسیعی در منطقه دیده می‌شود که نشان دهنده اکسیداسیون شدید کانیهای سولفیدی است. ضخامت زون اکسیدان بیش از ۸۰ متر است. بررسیهای ژئوشیمیایی، ناهنجاریهای عناصر مس، طلا، روی، آرسنیک، مولیبدن، کبالت، اورانیم، عناصر نادر خاکی سبک، نیوبیم و توریم را نشان می‌دهد. نتایج مطالعات ژئوفیزیک هوایی نیز ناهنجاری بالای مغناطیسی و رادیومتری (اورانیم و توریم) را در کمربند آتشفشانی ائوسن میزبان معدن مشخص کرده است.

براساس ویژگیهای زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک، معدن فیروزه نیشابور یک کانی‌سازی بزرگ مس- طلا- اورانیم- عناصر نادر خاکی سبک نوع IOCG است. مقایسه ویژگیهای این معدن با معادن بزرگ IOCG دنیا نشان می‌دهد که این معدن شبیه دو معدن المپیک دم استرالیا و کاندلاریای شیلی است. همچنین مقایسه آن با دو کانسار IOCG قلعه‌زری و کوه‌زر نشان می‌دهد که معدن فیروزه نیشابور نخستین کانی‌سازی IOCG چندفلزی است که در ایران معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: *معدن فیروزه، مس، عناصر نادر خاکی سبک، اورانیم، کانسارهای IOCG*

مقدمه

کانسارهای مس- طلای همراه با اکسید آهن یا (IOCG) Iron-Oxide Copper Gold ذخایر سولفیدی همراه با مگنتیت کم‌تیتان یا اسپکیولاریت هستند که منشأ هیدروترمالی دارند و انواع کانی‌سازی برشی، رگه و رگ‌چه‌ای، افشان و توده‌ای در آنها دیده می‌شود. این کانسارها معمولاً پلی‌متال (مس، طلا، نقره، اورانیم، عناصر نادر خاکی، بیسموت، کبالت، نیوبیم و فسفر) می‌باشند و در ارتباط با گرانیتوئیدهای سری I یا A و یا استوک‌های آلکالین- کربناتیت بوده که اغلب کنترل ساختاری دارند. ارتباط آنها با توده‌های نفوذی مانند ذخایر پورفیری، واضح و مشخص نیست. سنگ میزبان این کانسارها متنوع و از سنگهای رسوبی از قبل موجود در منطقه تا سنگهای آتشفشانی- درونی مافیک تا فلسیک و حتی سنگهای دگرگونی مانند شیست‌ها و گنیس‌ها متغیر است. کانسارهای IOCG معمولاً بیش از ۲۰ درصد اکسید آهن دارند. زونهای آلتراسیون در این کانسارها بیشتر سدیک، پتاسیک، کلریت، سرسیت و کربنات است [۱]. این کانسارها در حوضه‌های کششی پشت کمربند زون فرورانش، ریفت‌های درون قاره‌ای،

*مسؤول مکاتبات: mhkarimpour@yahoo.com

نقاط داغ داخل قاره‌ای و حوضه‌های کششی بعد از تصادم قاره‌ای تشکیل می‌شوند [۲]. شناسایی این کانسارها اولین بار با کشف ذخیره بزرگ المپیک دم استرالیا آغاز شد [۳] و با اکتشاف کانسارهای دیگری مثل Starra (۱۹۸۰)، La Candelaria (۱۹۸۷)، Osborne (۱۹۸۸)، Ernest-Henry (۱۹۹۱)، و Alemao (۱۹۹۶) ادامه یافت. این کانسارها توسط هیتزمن و همکاران [۴] به عنوان IOCG معرفی شد، اما اکتشافات جدید و تحقیقات، به طبقه‌بندیهای جدید و مختلفی منجر شده است [۱۴-۵]. کانسارهای اکسید آهن توسط هیتزمن [۲] به دو گروه مگنتیت ± آپاتیت (نوع کایرونا) و نوع مس- طلا همراه با اکسید آهن (IOCG)تقسیم شده‌اند. کریم‌پور [۱۳] کانسارهای نوع مگنتیت را به سه دسته مگنتیت- آپاتیت (مانند چغارت)، مگنتیت- عناصر نادر خاکی (مانند اسفوردی) و مگنتیت (مانند سنگان) و کانسارهای نوع مس- طلای همراه با اکسید آهن (IOCG) را به چهار دسته IOCG همراه با مگنتیت (مس- طلا- اورانیم- عناصر نادر خاکی) مثل المپیک دم، IOCG همراه با مگنتیت (مس- طلا) مانند کندلاریا، IOCG همراه با اسپکیولاریت (مس- طلا) مانند قلعه‌زری و IOCG همراه با اسپکیولاریت (طلا- مس) مثل کوه‌زر تقسیم کرده است. گندی [۱۵ و ۱۶] کانسارهای ماگماتیکی- هیدروترمالی اکسید آهن و ذخایر مس- طلای وابسته را به شش زیرگروه تقسیم نمود که مشخصات آنها در جدول (۱) ارائه شده است. گروز و همکاران [۱۴] نیز ذخایر اکسید آهن را به سه گروه بزرگ IOCG، اکسید آهن همراه با فسفر، عناصر نادر خاکی و فلوئور و کانسارهای اسکارن تقسیم کرده‌اند.کریم‌پور [۱۷] برای اولین بار در ایران کمربند آتشفشانی- نفوذی خواف- کاشمر- بردسکن یا همان خواف- درونه را به عنوان کمربند حاوی کانسارهای تیپ اکسید آهن در ایران معرفی نمود. مناطق شناسایی شده در این کمربند عبارتند از: معدن طلا کوه‌زر تربت حیدریه، معدن سنگ آهن سنگان، توده مگنتیت حاوی طلای تنورجه و توده‌های مگنتیت- اسپکیولاریت حاوی مس- طلای سعادت‌آباد و سایر مناطق دارای اندیس‌های مس و آهن در این کمربند. همچنین در پهنه بلوک لوت نیز این نوع کانی‌سازی مشاهده شده است. کانسار قلعه‌زری در جنوب‌غربی بیرجند از این نوع است [۱۳ و ۱۸]. شواهد کانی‌سازی Cu-Au همراه با مگنتیت- اسپیکولاریت در جنوب قلعه‌زری در منطقه بیشه نهبندان مشاهده گردیده است.معدن فیروزه نیشابور در ۵۵ کیلومتری شمال‌غرب شهرستان نیشابور در استان خراسان رضوی واقع شده است (شکل ۱). این معدن در کمان ماگمایی قاره‌ای سنوزوئیک شمال منطقه افیولیتی سبزوار که روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی دارد، قرار گرفته است. نوار آتشفشانی جنوب قوچان ماهیت غالباً کالک‌آلکالن داشته و سن آن از جنوب (در مجاورت نوار افیولیتی سبزوار) به سوی شمال (در جنوب قوچان) از ائوسن تا پلیو- پلئیستوسن تغییر می‌کند. عرض این کمربند ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلومتر از شمال سبزوار تا جنوب قوچان و طول آن ۲۰۰ کیلومتر از فرومد تا نیشابور ادامه داشته و آن را دنباله شرقی رشته‌کوههای بینالود دانسته‌اند [۱۹ - ۲۰]. سنگ میزبان معدن فیروزه نیشابور، عمدتاً واحدهای آتشفشانی حدواسط ائوسن است که می‌توان آن را بخشی از کمربند آتشفشانی- نفوذی شمال گسل درونه نیز به حساب آورد (شکل ۱). به عقیده [۲۰ - ۲۱] کمربند آتشفشانی جنوب قوچان احتمالاً ناشی از نابودی پوسته اقیانوسی نئوتتیس حوضه سبزوار در اواخر کرتاسه- پالئوسن در زون فرورانش حاشیه قاره با شیب به سوی شمال است. گرچه این فرورانش از اوائل ائوسن آغاز شده، به دلیل تداوم فرورانش پوسته اقیانوسی به درون گوشته و هضم آن، آخرین فرآورده‌های ماگمایی آن تا پلیو- پلئیستوسن نیز فوران داشته‌اند. قدمت معدن فیروزه نیشابور به حدود ۴۰۰۰ سال قبل می‌رسد. وجود کارهای قدیمی متعدد در قسمتهای مختلف معدن و تونلهای اکتشافی- استخراجی طویل و چند طبقه که هم اکنون نیز در حال بهره‌برداری هستند، تأییدی بر این ادعاست. اما متأسفانه به دلیل وجود یکی از مرغوبترین انواع فیروزه دنیا در این معدن، به عنوان یک سنگ قیمتی و تزیینی، همه توجهات به سوی این کانی معطوف بوده و فعالیتهای اکتشافی تفصیلی برای تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی و ژئوشیمی با مقیاس مناسب، اهمیت دیگر عناصر منطقه و سرانجام تعیین نوع کانی‌سازی صورت نگرفته است. گزارشهای بسیار قدیمی از فعالیتهای ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی که با همکاری سازمان زمین‌شناسی کشور و سازمان انرژی اتمی انجام شده از منطقه موجود است که نقشه‌های آنها در دسترس نیست و برخی اطلاعات به دلیل نداشتن موقعیت جغرافیایی درست، قابل استناد نیستند [۲۲ تا ۲۵].

جدول ۱. تقسیم‌بندی کانسارهای اکسید آهن ماگماتیکی- هیدروترمالی و کانسارهای مس- طلای وابسته [۱۵- ۱۶].

منشأ ← حاشیه‌ای ← جانبی			
ماگمای کالک‌آلکالن			
نوع کلانکری	**نوع المپیک دم**	**نوع کایرونا**	**نوع اسکارن آهن**
کانی‌سازی رگچه‌ای و افشان در سنگ آهن یا کانی‌سازی اکسید آهن قدیمی‌تر	برشی (با ماتریکس هماتیت یا مگنتیت)	مگنتیت توده‌ای- آپاتیت- اکتینولیت	مگنتیت توده‌ای- گارنت- پیروکسن
استراتاباند، برشی یا کنترل گسلی	شبیه دودکش، مجموعه نامنظم، کنترل گسلی یا منفذی	عدسی، شبیه دودکش، مجموعه نامنظم، دایکی و رگه‌ای	عدسیهای استراتاباند و مجموعه‌های نامنظم در مرز نفوذی
Cu, Au, Ag, Bi, Co, W	Fe, Cu, Au, Ag, REE	آهن و مس- طلای همراه با اکسید آهن	آهن و مس- طلای همراه با اکسید آهن
آلتراسیون پتاسیک	آلتراسیون پتاسیک	آلتراسیون سدیک	آلتراسیون سدیک
Osborne &Starra استرالیا	Olympic Dam استرالیا	Kiirunavaara سوئد	Magnitogorsk روسیه
ماگمای آلکالن- کربناتیت			
نوع بایان ابو		**نوع پالبورا**	
در سنگ دربرگیرنده		درون یا حاشیه توده نفوذی	
رگ‌چه‌ای، لایه‌ای و افشان، لنزهای استراتاباند		رگ‌چه‌ای، لایه‌ای و افشان	
مگنتیت- هماتیت- باستنائزیت- فلوگوپیت- اکسیدهای آهن-تیتان-کروم- نیوبیم، فلوریت- مونازیت- کربنات		مگنتیت کم‌تیتان- آپاتیت- اولیوین- فلوگوپیت- کربنات- فلوریت- سولفیدهای مس- پیریت- عناصر گروه پلاتین- طلا- نقره- بادلیت	
زونبندی، آلتراسیون سدیک و پتاسیک		زونبندی، آلتراسیون سدیک و پتاسیک	
Bayan Obo چین		Phalaborwa افریقای جنوبی	

برطبق این گزارشها، ناهنجاریهایی از عناصر مس، روی، نقره، آرسنیک، باریم، اورانیم، آنتیموان و مولیبدن در منطقه وجود دارد.وسعت زون گوسان منطقه که حدود ۶ کیلومتر مربع در سطح بوده و تا عمق ۸۰ متری در تونلها ادامه دارد و ناهنجاری عناصر مذکور در بالا، نشان می‌دهد که کانی‌سازی سولفیدی بزرگی همراه با برخی ویژگیهای خاص در ناحیه وجود دارد. هدف از این مقاله، ارائه نقشه‌های زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی و ژئوشیمی با مقیاس مناسب و اطلاعات تفصیلی آنها بوده است که در نهایت به شناسایی نوع کانی‌سازی مس در معدن فیروزه نیشابور منجر شده است

روش مطالعه

به منظور تعیین نوع کانی‌سازی معدن فیروزه نیشابور، عملیات اکتشافی زیر صورت گرفت:

۱- پردازش داده‌های ماهواره‌ای آستر در کمربند آتشفشانی جنوب قوچان به منظور شناسایی نوع و گسترش زون‌های آلتراسیون.

۲- برداشت بیش از ۱۵۰ نمونه از منطقه و تهیه و مطالعه ۱۳۰ مقطع نازک برای مطالعات پتروگرافی- آلتراسیون.

۳- تهیه و مطالعه ۴۰ بلوک صیقلی و مقطع نازک - صیقلی برای مطالعات کانی‌سازی- آلتراسیون.

۴- تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ از محدوده معدنی به وسعت حدود ۲ کیلومتر مربع با تأکید ویژه بر شناسایی توده‌های نفوذی علاوه بر واحدهای آتشفشانی.

۵- تهیه نقشه آلتراسیون با مقیاس ۱:۲۰۰۰ از محدوده معدنی به وسعت حدود ۲ کیلومتر مربع برای تفکیک دقیق زون‌های آلتراسیون.

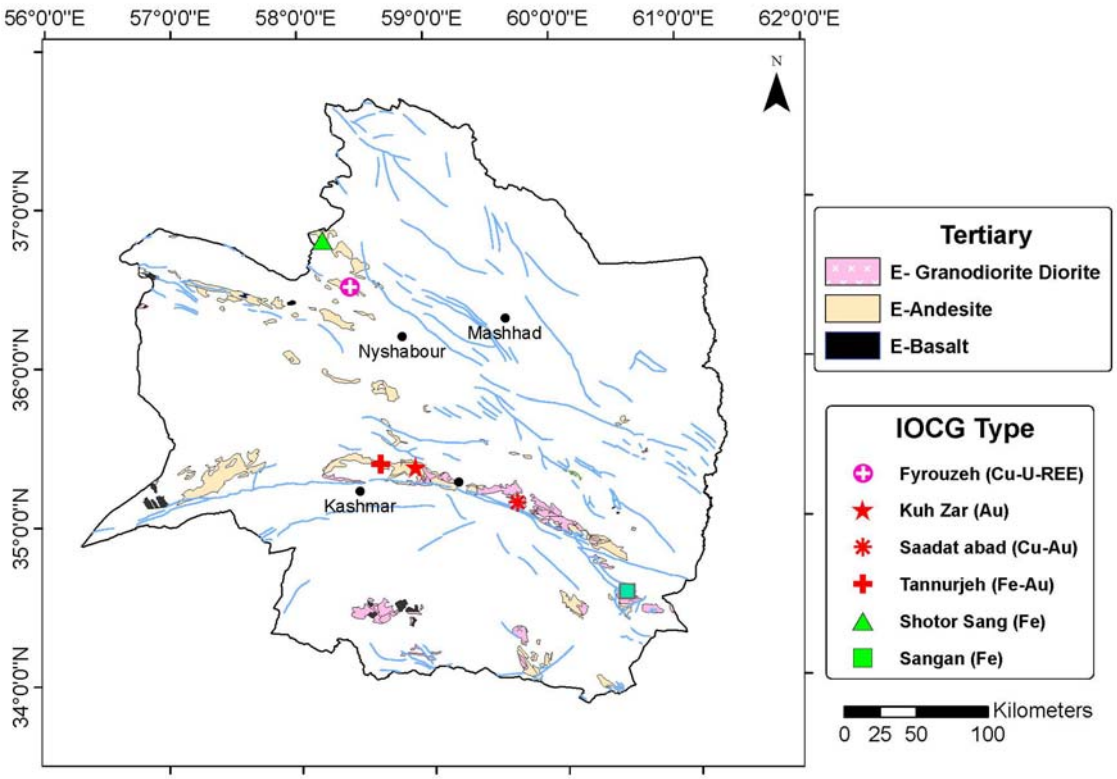
۶- تهیه نقشه‌های کانی‌سازی شامل توزیع اکسید آهن (به عنوان نماینده حضور سولفیدها) و فیروزه و نیز توزیع مگنتیت و اسپکیولاریت.

۷- اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی در واحدهای آتشفشانی و نفوذی.

۸- برداشت، آماده‌سازی و تجزیه ۴۶ نمونه ژئوشیمیایی به روش خرده‌سنگی که ۱۱ نمونه آن توسط ICP-MS

(روشهای 1DX، 4B و 1F15) در آزمایشگاه ACME کانادا برای عناصر نادر خاکی، طلا، نقره و غیره آنالیز شده و نیز توسط جذب اتمی در دانشگاه فردوسی مشهد برای عناصر مس، سرب، روی، کبالت و نیکل مورد بررسی قرار گرفته است.

۹- تفسیر اطلاعات مغناطیس‌سنجی و رادیومتری هوایی منطقه.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی معدن فیروزه نیشابور و محل آن در کمربند آتشفشانی ائوسن در شمال‌غربی استان خراسان رضوی و شمال گسل درونه.

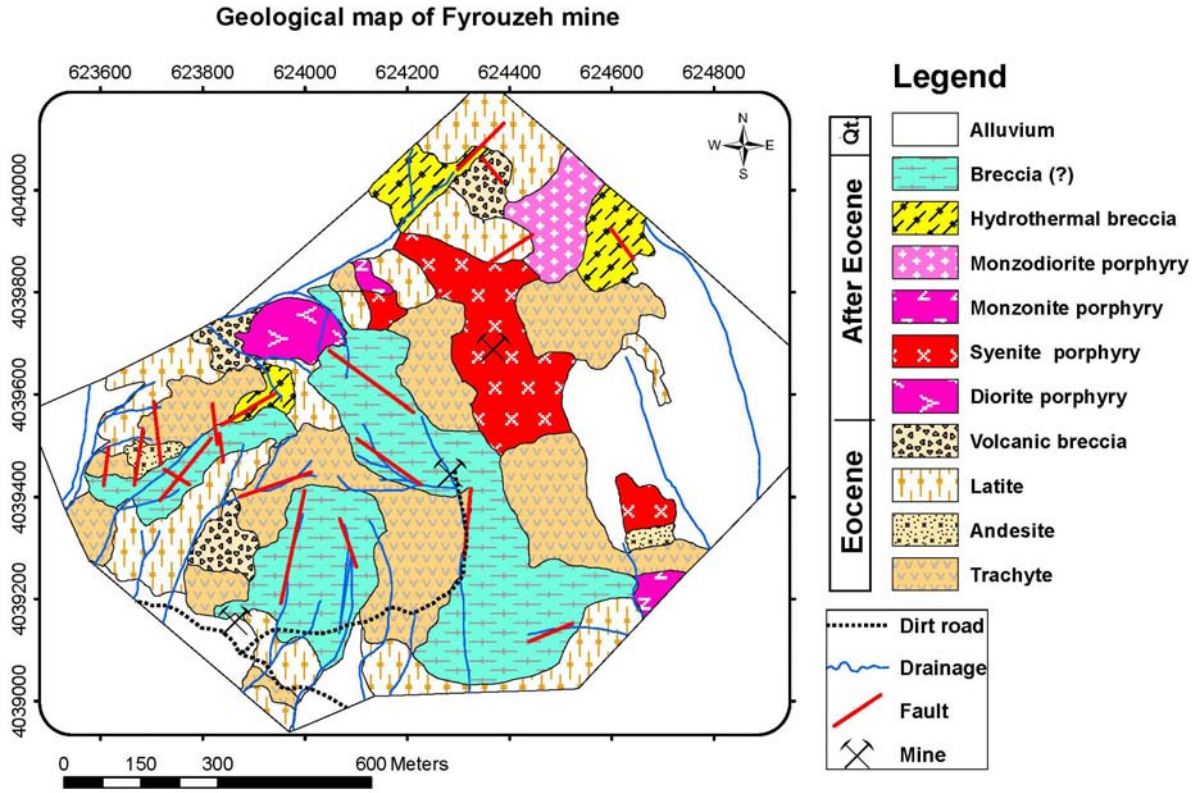
زمین‌شناسی

معدن فیروزه نیشابور در گوشه شمال‌شرقی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سلطان‌آباد [۲۶] واقع شده است. بیرون‌زدگیها در امتداد گسلهای رانده و رورانده نشان می‌دهد که پی‌سنگ این منطقه شامل سازندهای کهر، سلطانیه، زایگون، میلا و شیرگشت به سن پالئوزوئیک است که عمدتاً در نواحی جنوبی دیده می‌شود. آهکهای فسیل‌دار کرتاسه، ماسه‌سنگهای توفی- آهکی و مارن اوایل ائوسن نیز از دیگر رسوبات قدیمی منطقه هستند که در جنوب محدوده مشاهده می‌گردند. فعالیتهای آتشفشانی منطقه در ائوسن به اوج خود رسیده که شامل آندزیت، تراکیت، تراکی‌آندزیت و بازالت آندزیتی با رنگهای عمدتاً خاکستری و قرمز مایل به قهوه‌ای است. کمربند آتشفشانی بزرگ منطقه با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی گسترش دارد و معدن بزرگ فیروزه نیشابور در آن (شمال روستای معدن) واقع شده است. رسوبات ائوسن میانی و فوقانی به صورت رگه‌های شیب‌دار بر روی سنگهای آذرین قرار گرفته است. این رسوبات شامل کنگلومرا و آهکهای نومولیتی است. تراکی‌آندزیت خاکستری تیره در شرق محدوده، سن الیگوسن دارد. مارنهای ژیپس‌دار و ژیپس به سن میوسن در جنوب‌شرقی محدوده معدن دیده می‌شود. دو معدن فعال ژیپس نیز در این منطقه قرار دارد. واحد تراکی‌آندزیت و آندزیت داسیتی به سن پلیوسن- پلئیستوسن در شمال‌شرقی کمربند آتشفشانی ائوسن، میزبان معدن آخرین فعالیت آتشفشانی است [۲۶]. برپایه مطالعات صحرایی- آزمایشگاهی واحدهای سنگی محدوده معدن فیروزه نیشابور را به سه بخش واحدهای آتشفشانی، توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق و انواع مختلف

برش می‌توان تقسیم کرد. سنگهای آتشفشانی، بخش زیادی از منطقه را به خود اختصاص داده‌اند و سن نسبی آنها برپایه نقشه زمین‌شناسی سلطان‌آباد [۲۶] به ائوسن نسبت داده شده است. این واحدها شامل تراکیت، هورنبلند تراکیت، بیوتیت تراکیت، آندزیت، هورنبلند آندزیت، لاتیت، لاتیت- آندزیت، بیوتیت لاتیت، هورنبلند لاتیت- آندزیت و برش آتشفشانی است که از این میان، تراکیت بیشترین گسترش را در منطقه دارد. بافت این سنگها پورفیری و زمینه آنها عمدتاً دانه‌ریز و با بافت تراکیتی است. همه واحدهای آتشفشانی کم و بیش تحت تاثیر آلتراسیون‌های سیلیسی، آرژیلیکی و غیره قرار گرفته‌اند و در برخی نقاط به سبب شدت آلتراسیون، ماهیت اولیه سنگ مشخص نبوده و به عنوان سنگهای آلتره در نقشه معرفی شده‌اند (شکل ۲). کانی‌سازی سولفیدی- اکسیدی اولیه به صورت افشان و استوک‌ورک و کانی‌سازی ثانویه در اغلب نقاط در آنها دیده می‌شود. برش آتشفشانی در غرب و جنوب‌غربی معدن دیده می‌شود و شامل قطعاتی از سنگهای لاتیت، بیوتیت لاتیت و هورنبلند تراکیت است که در سیمانی از جنس تراکیت قرار گرفته‌اند. قطعات و سیمان آلتره شده‌اند و کانی‌سازی پیریت اکسید شده افشان عمدتاً در قطعات دیده می‌شود (شکل ۲). توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق حدواسط با بافت پورفیری عمدتاً در بخشهای شمالی و شرقی معدن رخنمون دارند که در سنگهای آتشفشانی نفوذ نموده‌اند. به همین دلیل، سن نسبی آنها در نقشه بعد از ائوسن معرفی شده است. این واحدها شامل دیوریت پورفیری، سینیت پورفیری، مونزونیت پورفیری و مونزودیوریت پورفیری هستند که سینیت پورفیری بیشترین گسترش را دارد (شکل ۲). بافت این سنگها، پورفیری با زمینه دانه متوسط تا درشت بعضاً تراکیتی است. براساس مقدار کانیهای پلاژیوکلاز و فلدسپات پتاسیم درشت‌بلور و زمینه سنگ، این توده‌ها از هم تفکیک شدند. این واحدها تحت تاثیر آلتراسیون‌های مختلف سیلیسی، آرژیلیکی و کربناتی در نقاط مختلف قرار گرفته و رگ‌چه‌های سولفید اکسید شده (عمدتاً پیریت)، مگنتیت و اسپکیولاریت همراه با کانی‌سازی افشان گاهی تا ۱۰ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهند. این واحدها در واقع رخنمونهایی از توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق منشأ کانی‌سازی بزرگ منطقه هستند. مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در واحدهای آتشفشانی و نفوذی کمتر آلتره شده از ۵۰×۱۰^{-۵} SI تا ۴۷۴×۱۰^{-۵} SI متغیر است. ایشی‌هارا [۲۷] مقدار پذیرفتاری مغناطیسی گرانیتوئیدهای سری مگنتیت را بیش از ۵۰×۱۰^{-۵} SI می‌داند. بنابراین همه این سنگها متعلق به گرانیتوئیدهای سری مگنتیت و از نوع اکسیدان هستند. برش گسلی و هیدروترمالی در منطقه نیز مشاهده می‌شود که بخش زیادی را به خود اختصاص داده‌اند. برش هیدروترمالی که نوعی کانی‌سازی بوده و بخشی از کانه‌های سولفیدی- اکسیدی را با خود همراه دارد، در شمال و غرب منطقه دیده می‌شود. این واحد شامل قطعاتی از سنگهای آتشفشانی به شدت آلتره (سیلیسی- آرژیلیکی) است که در سیمانی از سیلیس همراه با سولفید اکسید شده و مگنتیت قرار گرفته‌اند. کانی‌سازی هم در قطعات و هم در سیمان دیده می‌شود که نشان دهنده دو مرحله کانی‌سازی در منطقه است. برش گسلی نیز به سبب تکتونیک فعال منطقه، گسترش زیادی در مرکز و جنوب ناحیه دارد (شکل ۲).

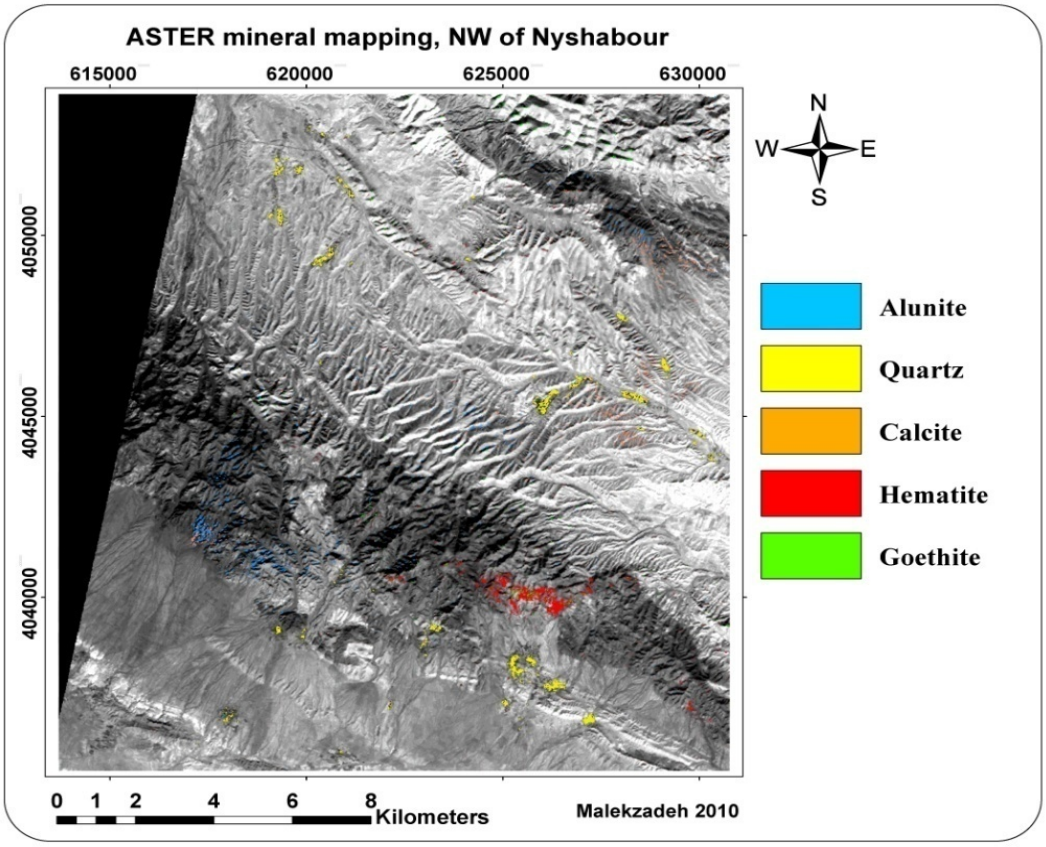
آلتراسیون

ملک‌زاده و کریم‌پور [۲۸] تصویر سنجنده آستر را در بخش وسیعی از کمربند آتشفشانی میزبان معدن و مناطق اطراف آن برای کانیهای کلریت، اپیدوت، کوارتز، آلونیت، کائولینیت، هماتیت، گوتیت، مونت‌موریلونیت و کلسیت به روش نقشه‌برداری زاویه طیفی پردازش کردند. دو محدوده مهم آلتره شده در کمربند آتشفشانی ائوسن و در اطراف معدن فیروزه تشخیص داده شد که عبارتند از: ۱) آلتراسیونی با وسعت ۳ کیلومتر مربع در شمال‌شرقی تونلها با آلتراسیون‌های پروپلیتیک و هماتیتی شدید، و ۲) آلتراسیونی با وسعت ۴ کیلومتر مربع در غرب محدوده و غرب معدن با آلتراسیون‌های آرژیلیک، آلونیتی و کربناتی (شکلهای ۳ تا ۵). آلتراسیون سیلیسی نیز به طور پراکنده در اطراف معدن فیروزه بارز شده، ولی مطالعات صحرایی نشان می‌دهد که این مهمترین آلتراسیون در بخش معدن، تونلها و اطراف آن است. براساس مطالعات صحرایی- آزمایشگاهی، همه واحدهای آتشفشانی و نفوذی منطقه، تحت تأثیر آلتراسیون قرار گرفته‌اند.آلتراسیون‌ها روند خطی نداشته و فقط محدود به اطراف زون‌های گسلی نیستند، بلکه گسترده بوده و نشان دهنده حضور یک کانی‌سازی بزرگ در منطقه می‌باشند. وسعت آلتراسیون در سطح تا حدود ۵ کیلومتر مربع بوده و در عمق نیز تا بیش از ۱۰۰ متر در تونلها ادامه دارد.

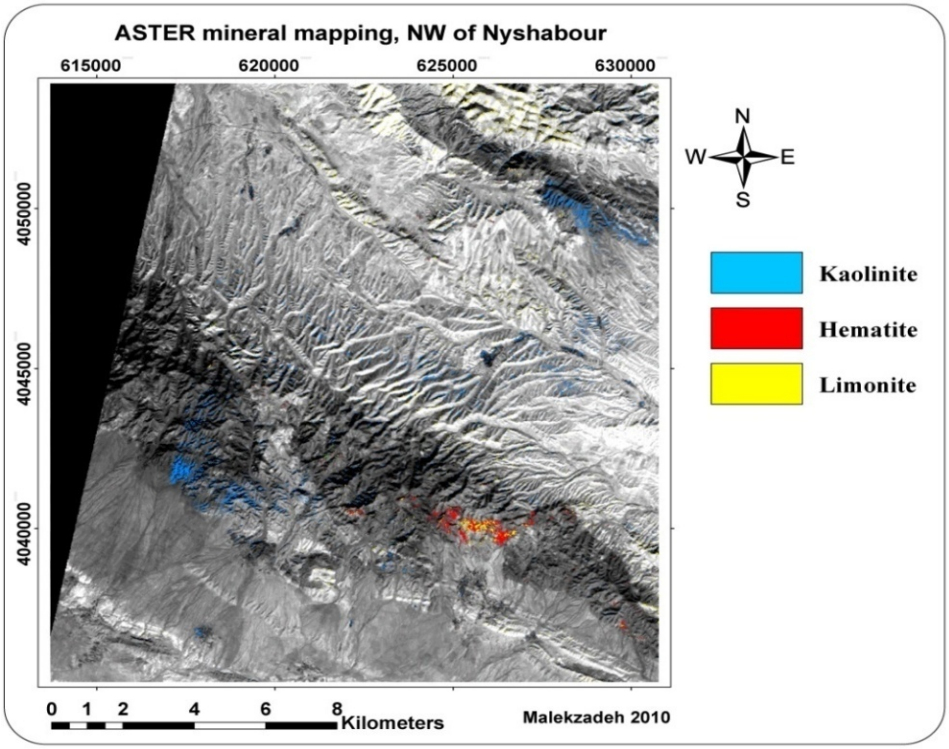


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده معدن فیروزه.

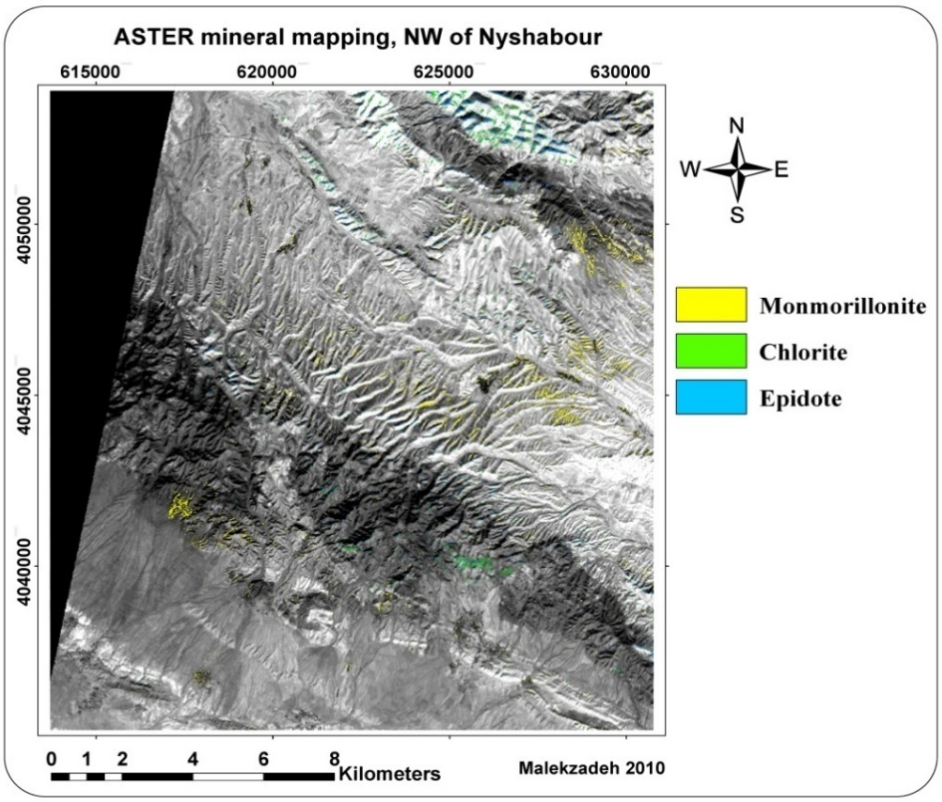
چهار زون آلتراسیون به ترتیب فراوانی شامل سیلیسی، آرژیلیک، کربناتی و پروپلیتیک در محدوده معدن با شدتهای مختلف قابل مشاهده است که خود به زیر مجموعه‌هایی قابل تقسیم است. آلتراسیون سیلیسی، بیشترین گسترش را در منطقه دارد و سبب مورفولوژی خشن و صخره‌ساز شده است. همراهی این آلتراسیون با زون گوسان شدید باعث رنگ قرمز- قهوه‌ای تیره تا سیاه آن در سطح زمین شده است. کوارتز ثانویه در متن سنگ و به صورت رگ‌چه حضور دارد و کانی‌سازی سولفیدی- اکسیدی با این آلتراسیون دیده می‌شود. این آلتراسیون به انواع سیلیسی شدید، سیلیسی متوسط، سیلیسی- کربناته و سیلیسی- آرژیلیک قابل تقسیم است (شکل ۶). آلتراسیون آرژیلیک در قسمتهای مختلف معدن دیده شده و با رنگ سفید- زرد (به دلیل حضور مقدار بالایی ژاروسیت در برخی قسمتها) و مورفولوژی نرم و پست مشخص می‌گردد. این آلتراسیون، واحدهای آتشفشانی، برشی و بخشی از توده‌های نفوذی مانند سینیت پورفیری را تحت تاثیر قرار داده است. کانی‌سازی سولفیدی به صورت پراکنده و رگ‌چه‌ای در این زون مشاهده می‌شود. این زون به زیرمجموعه‌های آرژیلیک شدید، آرژیلیک متوسط، ژاروسیتی- آرژیلیک و ژاروسیت- آرژیلیک- سیلیسی قابل تقسیم است (شکل ۶). آلتراسیون کربناتی عمدتاً در بخشهای شمالی و جنوب‌شرقی معدن دیده می‌شود که سنگهای آتشفشانی و بخشی از توده‌های نفوذی را تحت تاثیر قرار داده است. در برشهای مختلف نیز این زون مشاهده می‌گردد. کلسیت به صورت رگ‌چه‌ای و پراکنده دیده می‌شود و کانی‌سازی در برخی نقاط وجود دارد. آلتراسیون پروپلیتیک متوسط و پروپلیتیک- سیلیسی ضعیف در شمال، جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی معدن، محدوده‌های نسبتاً کوچک تا متوسطی را به خود اختصاص داده است. این زون در سنگهای آندزیتی دیده می‌شود و کانیهای مهم آن کلریت و کربنات است (شکل ۶). تورمالین یکی از کانیهای مهم در زون‌های آلتراسیون منطقه است که در شمال، غرب و شمال‌غربی منطقه دیده می‌شود (شکل ۶). این کانی ثانویه در توده دیوریت پورفیری و سنگهای بیوتیت‌لاتیت، آندزیت، لاتیت و تراکیت مشاهده شد. بیشترین درصد تورمالین (۱۰ - ۱۵درصد) در توده آندزیتی و کمترین درصد آن (۰/۵-۱ درصد) مربوط به توده لاتیت است. تورمالین در این سنگها هم به صورت رگ‌چه‌ای همراه با کانیهای سولفیدی و سیلیس با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر و هم به صورت پراکنده در حفرات و متن سنگ دیده می‌شود



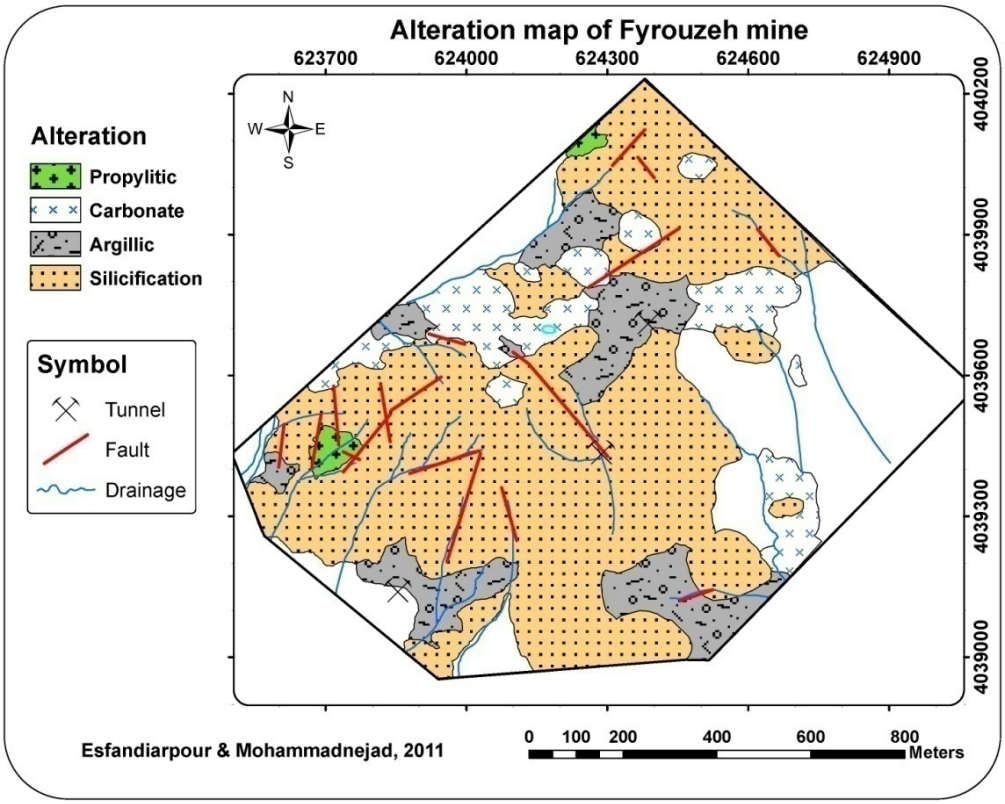
شکل ۳. پردازش تصویر سنجنده آستر برای کانیهای آلونیت، کوارتز، کلسیت، هماتیت و گوتیت به روش نقشه‌برداری زاویه طیفی در کمربند آتشفشانی شمال‌غرب نیشابور [۲۸].



شکل ۴. پردازش تصویر سنجنده آستر برای کانیهای کائولینیت، هماتیت و لیمونیت به روش نقشه‌برداری زاویه طیفی در کمربند آتشفشانی شمال‌غرب نیشابور [۲۸].



شکل ۵. پردازش تصویر سنجنده آستر برای کانیهای مونت‌موریونیت، کلریت و اپیدوت به روش نقشه‌برداری زاویه طیفی در کمربند آتشفشانی شمال‌غرب نیشابور [۲۸].



شکل ۶. نقشه آلتراسیون محدوده معدن فیروزه.

کانی‌سازی

وجود کنده‌کاریهای قدیمی متعدد (شکل ۷)، در یک منطقه وسیع و بهره‌برداری از سه تونل که در چندین طبقه تا عمق ۱۰۰ متری حفر شده و طول بزرگترین آنها تا ۳ کیلومتر می‌رسد، نشان دهنده وسعت کانی‌سازی در معدن فیروزه نیشابور است. گستردگی آلتراسیون نیز این موضوع را تأیید می‌کند. فیروزه که در حال حاضر مهمترین و با ارزشترین کانی معدن به حساب می‌آید، یک کانی ثانویه و کاملاً تاخیری است که کانی‌سازیهای اولیه سولفیدی- اکسیدی را قطع نموده است (شکل ۸). این کانی به دلیل اکسیداسیون وسیع سولفیدهای مس‌دار منطقه و حضور ترکیبات فسفاته مانند آپاتیت، تشکیل شده است. ضخامت زون اکسیدان منطقه بسیار زیاد است، به طوری که فیروزه تا عمق ۸۰ متری در تونلها دیده شده است. اکسیداسیون بسیار شدیدی در سطح منطقه اتفاق افتاده و زون گوسان با درصد بالای اکسید آهن که باعث رنگ تیره سنگهای آتشفشانی شده است، در محدوده وسیعی مشاهده می‌شود (شکل ۹). این موضوع نشان دهنده حجم وسیع وجود کانی سولفیدی در ناحیه بوده و تأییدی بر گستردگی کانی‌سازی است، بنابراین کانی‌سازی بسیار مهمتری از فیروزه در منطقه حضور دارد. بررسیهای صحرایی- آزمایشگاهی نشان می‌دهد، کانی‌سازی از لحاظ زمان تشکیل شامل دو مرحله اولیه و ثانویه می‌شود. کانی‌سازی اولیه به صورت استوک‌ورک، افشان و برش هیدروترمالی دیده می‌شود و شامل اسپکیولاریت، مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت و بورنیت است. در برخی قسمتها، کنترلهای ساختاری برای رگ‌چه‌های کانی‌سازی دیده می‌شود، به طوری که در اطراف زون‌های گسلی تراکم رگ‌چه‌ها افزایش یافته است. کانی‌سازی استوک‌ورک و افشان در واحدهای تراکیت، لاتیت، بیوتیت تراکیت، هورنبلند آندزیت، لاتیت- آندزیت، بیوتیت لاتیت، دیوریت پورفیری، مونزودیوریت پورفیری، مونزونیت پورفیری و سینیت پورفیری دیده می‌شود. کانی‌سازی استوک‌ورک با رگ‌چه‌هایی به ضخامت حداکثر ۵ تا۶ میلی‌متر دیده می‌شود. تراکم رگ‌چه‌ها در نزدیک زون‌های گسلی تا ۳۰ رگ‌چه و دیگر قسمتها تا ۱۵ عدد در متر مربع می‌رسد. رگ‌چه‌ها از نوع سولفید اکسید شده با هاله کانیهای رسی، کوارتز- پیریت، پیریت- کالکوپیریت، اسپکیولاریت و مگنتیت است (شکلهای ۱۰ تا ۱۲). کانی‌سازی افشان با دانه‌های شکل‌دار، نیمه‌شکل‌دار و بی‌شکل پیریت، مگنتیت، اسپکیولاریت و به مقدار کمتر، کالکوپیریت و بورنیت به اندازه ۰/۵ تا ۸ میلی‌متر مشخص می‌شود. برش هیدروترمالی شامل قطعاتی از سنگهای آتشفشانی به شدت آلتره (سیلیسی- آرژیلیکی) همراه با کانی‌سازی است که در سیمانی از سیلیس همراه با سولفید اکسید شده و مگنتیت قرار گرفته‌اند. به میزان ۱۵ تا ۱۷ درصد کانی‌سازی به صورت افشان هم در سیمان سیلیسی و هم در قطعات دیده می‌شود. دو مرحله کانی‌سازی در برش هیدروترمالی دیده می‌شود: ۱) مرحله قبل از برشی‌شدن که کانی‌سازی در قطعات وجود دارد و ۲) مرحله هنگام برشی‌شدن که کانی‌سازی توسط محلول کانه‌دار سیلیسی ایجاد شده است. شکل (۱۳) توزیع مگنتیت و اسپکیولاریت استوک‌ورک و افشان را در منطقه نشان می‌دهد. مگنتیت عمدتاً در نیمه جنوبی و اسپکیولاریت در نیمه شمالی منطقه دیده می‌شود. مقدار اسپکیولاریت از ۰/۱ تا نزدیک ۶ درصد است و مگنتیت بیش از ۱۰ درصد در برخی قسمتها در منطقه حضور دارد. کانی‌سازی ثانویه منطقه شامل فیروزه، کالکوزیت، کوولیت، ژاروسیت، لیمونیت، هماتیت و گوتیت می‌باشد. به دلیل اکسیداسیون شدید منطقه و از بین رفتن کانیهای سولفیدی، نقشه توزیع اکسید آهن برای منطقه که گویای حضور سولفیدها است، ترسیم شد. مقدار اکسیدهای آهن از ۱ تا بیش از ۶ درصد متغیر است (شکل ۱۴). پراکندگی فیروزه نیز در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

ژئوشیمی

براساس بررسیهای ژئوشیمیایی [۲۲] و ژئوفیزیکی [۲۵] اولیه در گذشته، ناهنجاریهایی از عناصر مس، مولیبدن، سرب، روی، اورانیم، تنگستن، کبالت و نیکل در منطقه گزارش شده که نشان دهنده اهمیت معدن فیروزه نیشابور برای عناصری غیر از مس و کانی غیر از فیروزه است.

تعداد ۴۶ نمونه خرده‌سنگی از محلهای آلتراسیون و کانی‌سازی برای مطالعات ژئوشیمیایی منطقه برداشت شد که جدول (۲) نتایج تجزیه تعدادی از عناصر مهم منطقه را نشان می‌دهد. نتایج به شرح زیر است:

مس: میزان این عنصر از ۸ تا ۳۲۲۲ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در قسمت شرق تونل اصلی معدن در واحد هورنبلند تراکیت و با آلتراسیون سیلیسی- آرژیلیکی‌دیده می‌شود. این عنصر بیشتر در قالب کانی فیروزه و

مقدار کمتری کالکوپیریت، کالکوزیت و کوولیت است (شکل ۱۵).

طلا: این عنصر از ۱ تا ۷۳ میلی گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در مرکز منطقه همراه با برش گسلی و با آلتراسیون ژاروسیتی- آرژیلیکی دیده می‌شود (شکل ۱۶).

نقره: این عنصر از ۶۸ تا ۲۰۰۰ میلی گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در مرکز منطقه همراه با تراکیت و با آلتراسیون ژاروسیتی- آرژیلیکی- سیلیسی دیده می‌شود (شکل ۱۷).

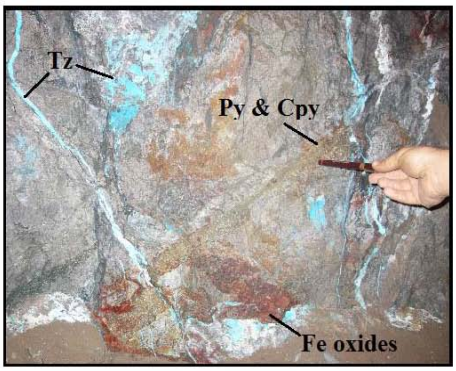
مولیبدن: این عنصر از ۸ تا ۷۷۷ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در سینیت پورفیری با آلتراسیون کربناتی دیده می‌شود (شکل ۱۸).

آرسنیک: این عنصر از ۵۰ تا ۵۵۳ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در مرکز منطقه همراه با واحدهای تراکیت و لاتیت با آلتراسیون‌های ژاروسیتی- آرژیلیکی- سیلیسی و کربناتی دیده می‌شود (شکل ۱۹).

سرب: این عنصر از ۳ تا ۸۰ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در شمال منطقه همراه با لاتیت و با آلتراسیون سیلیسی- کربناتی دیده می‌شود.

روی: این عنصر از ۱ تا ۴۴۳ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن همراه با تراکیت و با آلتراسیون کربناتی دیده می‌شود.

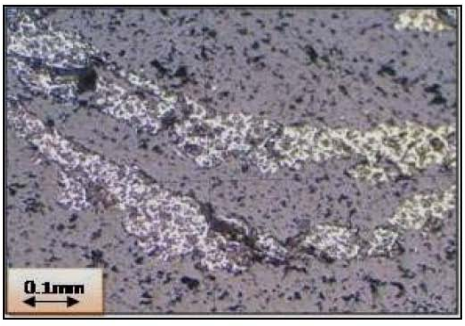
شکل ۷. نمایی از کنده‌کاریهای قدیمی (دید به شرق).



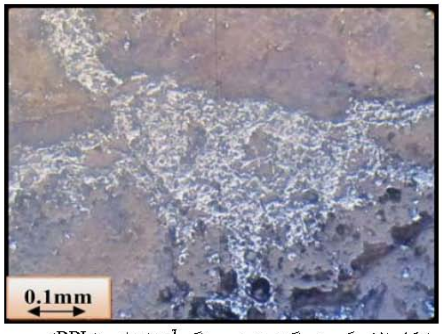
شکل ۸. نمایی از رگ‌چه‌های فیروزه که رگ‌چه‌های پیریت و کالکوپیریت اولیه را قطع نموده است.

شکل ۹. نمایی از زون گوسان معدن فیروزه.

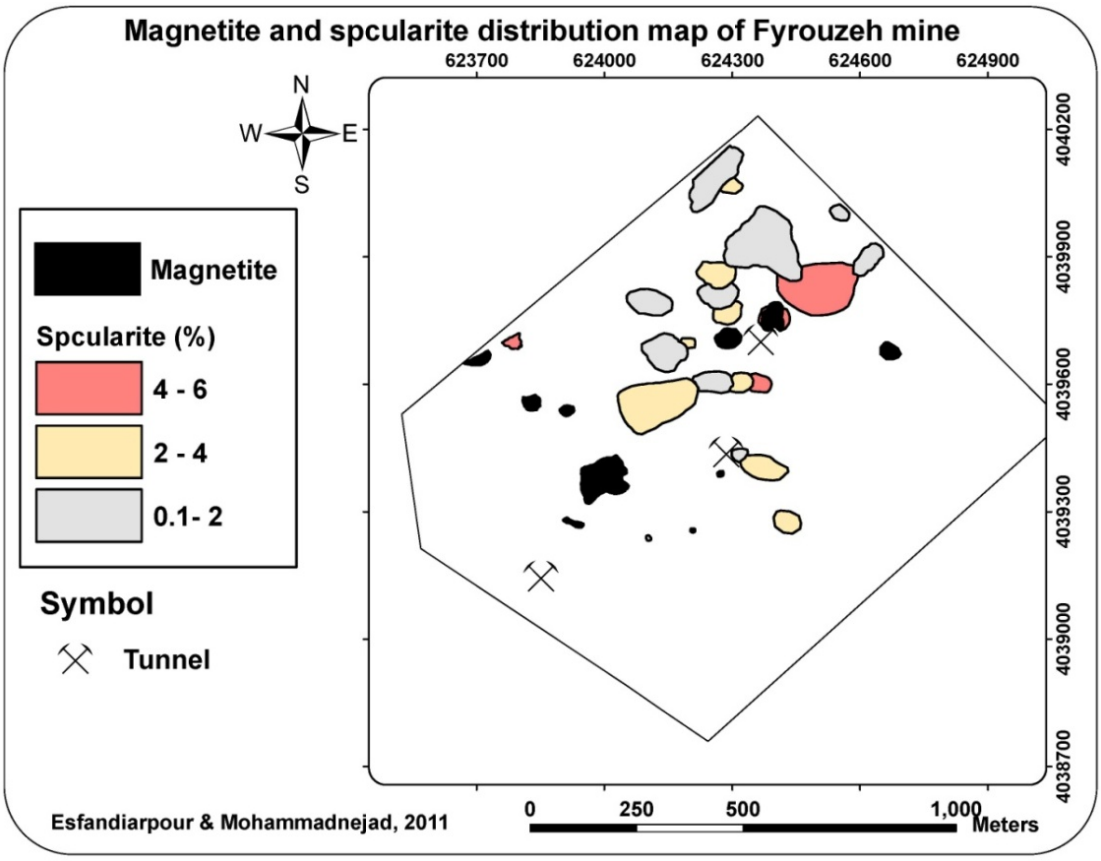
شکل ۱۰. رگ‌چه اسپکیولاریت در واحد آتشفشانی (PPL).



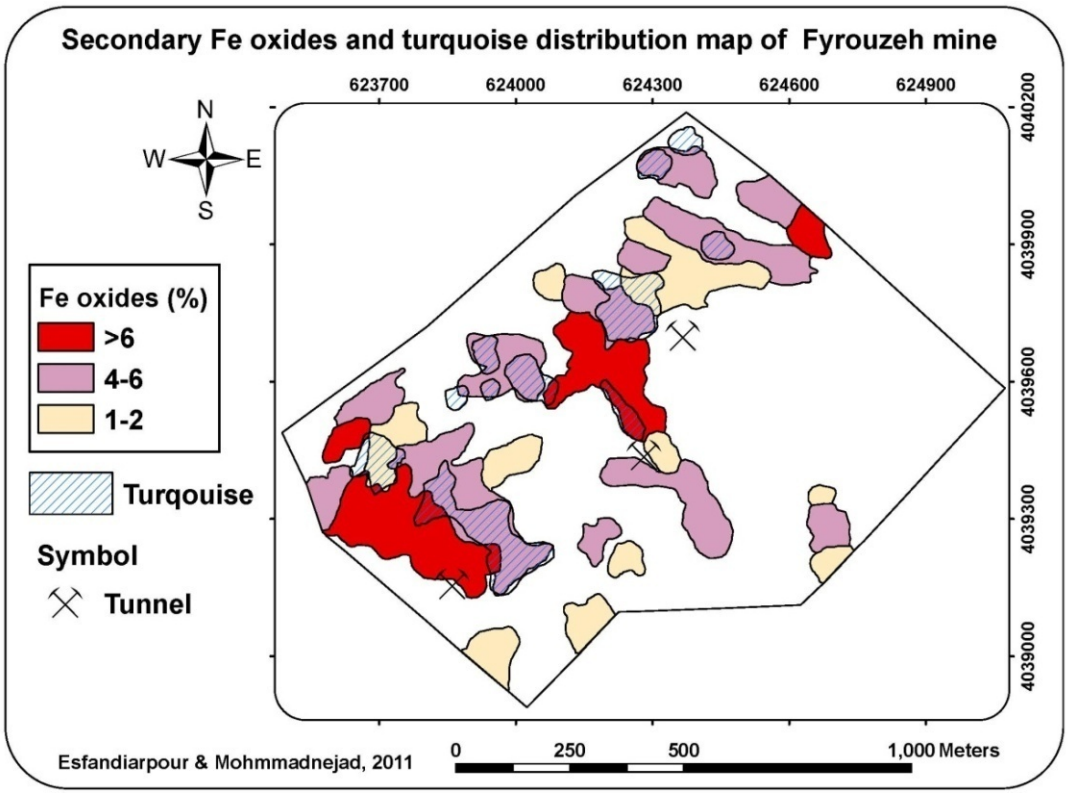
شکل ۱۱. پیریت رگ‌چه‌ای در لاتیت (PPL).



شکل ۱۲. رگ‌چه مگنتیت در سنگ آتشفشانی (PPL).



شکل ۱۳. نقشه توزیع مگنتیت و اسپکیولاریت در معدن فیروزه نیشابور.



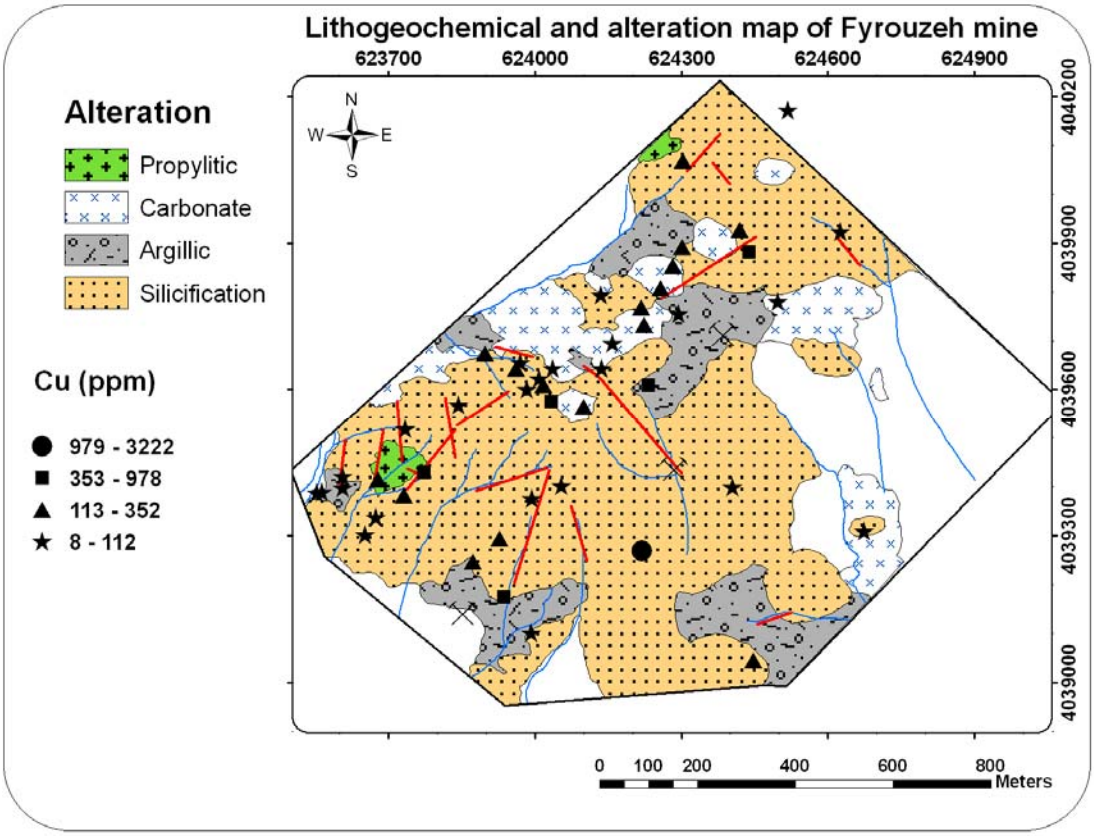
شکل ۱۴. نقشه توزیع اکسیدهای آهن ثانویه و فیروزه در معدن فیروزه نیشابور.

جدول ۲. نتایج تجزیه برخی عناصر مهم در نمونه‌های خرده‌سنگی معدن فیروزه نیشابور.

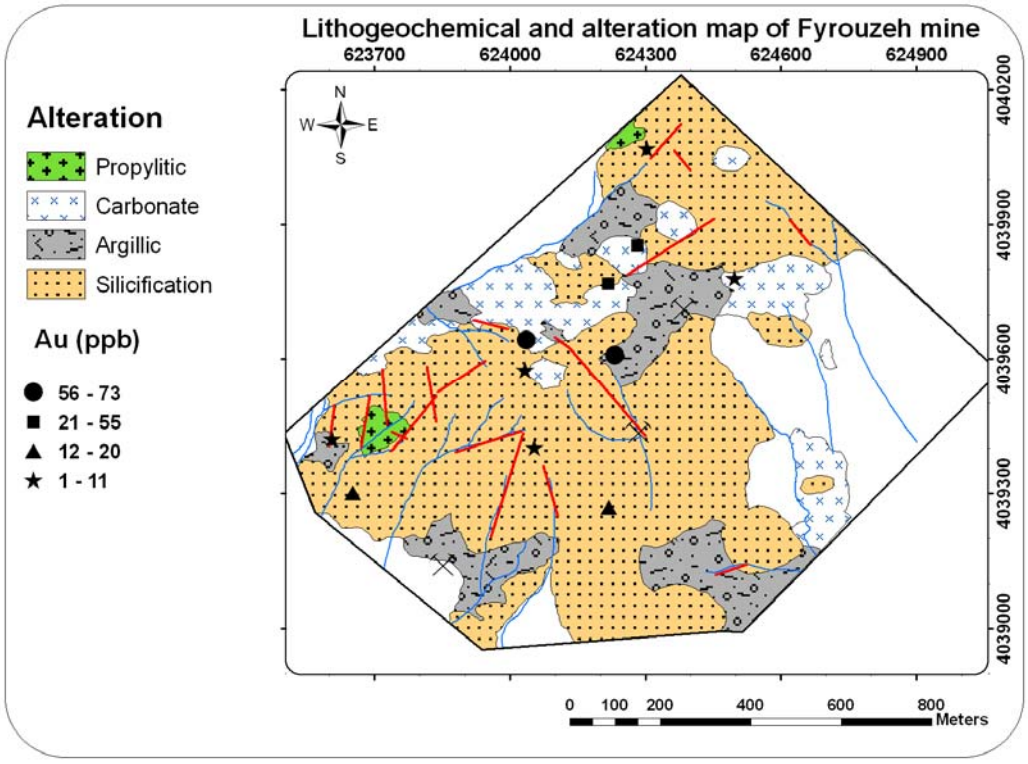
	X	Y	Co (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Ag (ppb)
TZC-1	623899	4039675	۲۴	۳۲۱	۱۰	۲۷	۶۷	
TZC-2	623962	4039643	۴	۱۹۷	۳	۱۳	۷	
TZC-3	623971	4039656	۷	۱۷	۵	۱۴	۳۳	
TZC-4	623984	4039601	۱۸	۶۲	۵	۱۴	۸۰	
TZC-5	624018	4039610	۷	۱۷۶	۵	۱۴	۱۰	
TZC-6	624038	4039643	۱۲	۲۹	۶۱	۲۳	۶۸	۶۸
TZC-7	624137	4039643	۸	۱۹	۵	۱۶	۲۹	
TZC-8	624159	4039695	۶۲	۴۶	۲۶	۲۶	۱۴۰	
TZC-9	624219	4039768	۵	۲۳۶	۱	۱۱	۵	۲۰۰
TZC-10	624136	4039794	۳۲	۱۹	۲۵	۲۰	۲۷۱	
TZC-11	624259	4039809	۲۲	۲۴۲	۱۷	۲۲	۳۰	
TZC-12	624283	4039854	۴۶	۱۴۰	۲۱	۴	۲۹	۳۷۹
TZC-13	624303	4039892	۲۳	۲۳۸	۱۲	۲۲	۹۹	
TZC-14	624304	4040069	۱۴۳	۱۶۳	۴۳	۱۷	۷۰	۲۰۹
TZC-15	624225	4039734	۱۴	۱۴۱	۱۱	۱۷	۲۰	
TZC-16	624295	4039755	۱۸	۱۹	۱۰	۱۶	۱۵	
TZC-17	624420	4039927	۸۱	۳۵۲	۲۸	۸۰	۲۰۳	
TZC-18	624519	4040172	۲۶	۵۱	۱۹	۴۹	۴۲	
TZC-19	624233	4039609	۱۴	۴۰۴	۱۸	۲۹	۲۱	۲۰۰۰
TZC-20	624440	4039882	۷۳	۴۶۴	۳۶	۳۱	۱۱۹	
TZC-21	624627	4039923	۱۶	۲۸	۱۰	۱۸	۳۷	
TZC-22	624499	4039781	۷۲	۲۷	۱۷	۱۷	۴۴۳	۷۷
TZC-23	624406	4039399	۵۲	۹۸	۲۱	۳۳	۱۰۲	
TZC-24	624448	4039046	۶۹	۲۶۵	۳۴	۴۱	۱۰۹	
TZC-25	624675	4039309	۱۰	۸	۸	۴۹	۳۵	
TGC1	623555	4039387	۵	۴۷	۶	۲۸	۱۲	
TGC2	623565	4039389	۱	۲۳	۳	۱۷	۸	
TGC3	623608	4039397	۳	۳۵	۵	۲۶	۱۱	
TGC5	623680	4039416	۱	۱۵۸	۳	۲۰	۶	
TGC6	623735	4039518	۱۶	۴۲	۹	۳۲	۷۶	
TGC7	623844	4039568	۱۳	۴۴	۴	۲۱	۸۴	
TGC9	623675	4039337	۱	۸	۲	۱۹	۹	
TGC10	623733	4039383	۱	۲۹۳	۱	۱۶	۱۸	
TGC11	623774	4039430	۱	۳۹۶	۱	۲۰	۸	
TGC13	624010	4039623	۳	۸	۲	۳۲	۱۰	
TGC14	623874	4039248	۱۸	۲۱۵	۱	۳۶	۴۲	
TGC15	623929	4039294	۶۱	۲۶۱	۳۶	۷۱	۲۹۴	
TGC16	623995	4039375	۴۹	۱۱۲	۳۰	۵۱	۲۱۵	
TGC18	624101	4039565	۱۰	۱۷۳	۶	۳۲	۲۴	
TGC19	623938	4039175	۶	۴۰۳	۳	۶۸	۲۵	
TGC21	623993	4039102	۵	۷۱	۴	۳۵	۵	
TGC4	623608	4039421	۲۷	۴۲	۶	۳	۳۳۳	۶۹
TGC8	623653	4039302	۳	۱۹	۱	۶	۱	۷۰۰
TGC12	624034	4039576	۳۴	۹۷۸	۱۱	۲۰	۲۳۵	۲۴۱
TGC17	624055	4039402	۵۶	۹۰	۱۸	۲۰	۱۶۰	۱۰۰
TGC20	624220	4039269	۷۲	۳۲۲۲	۲۱	۲۴	۱۰۵	۱۲۰۰

ادامه **جدول ۲.**

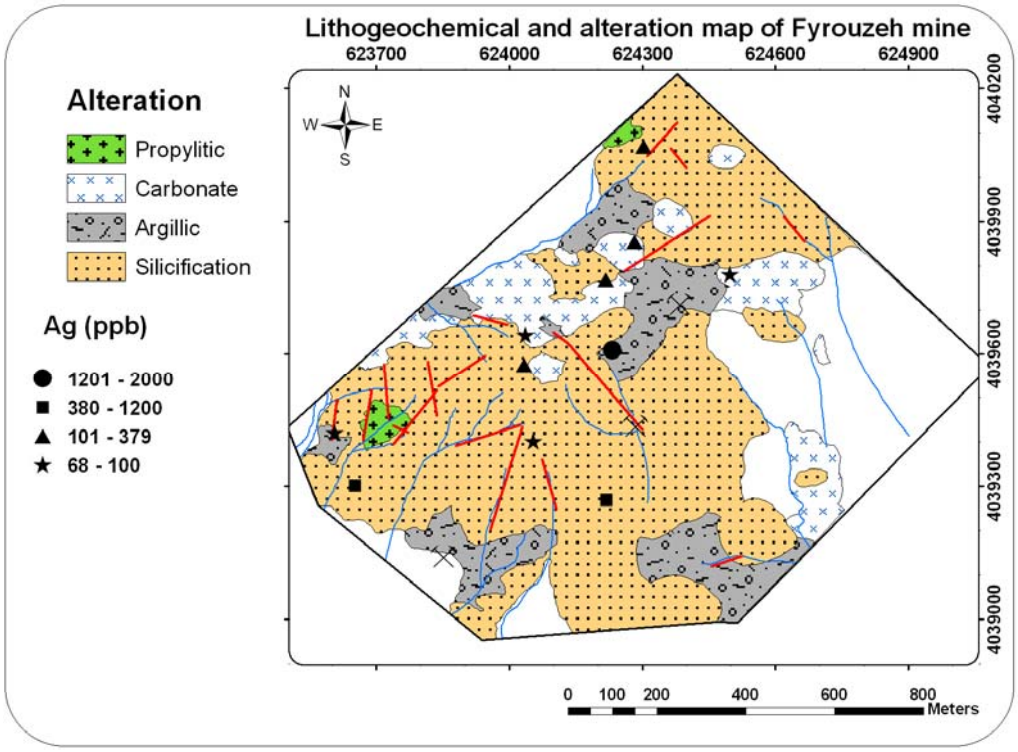
	X	Y	Au (ppb)	La (ppm)	Ce (ppm)	P (%)	As (ppm)	U (ppm)	Mo (ppm)	Nb (ppm)	Th (ppm)
TZC-6	624038	4039643	۷۳	۳۲	۵۹	۰/۰۸۱	۵۳	۱	۹	۲	۵
TZC-9	624219	4039768	۵۴	۹۶	۱۴۲		۵۵۳	۹	۴۴	۷۶	۱۴
TZC-12	624283	4039854	۵۵	۷۷	۱۲۹	۰/۲۲	۲۳۴	۴	۷۷۷	۲	۵
TZC-14	624304	4040069	۱	۳۲	۵۲	۰/۰۷۱	۱۶۸	۲	۲۴	۸	۱۳
TZC-19	624233	4039609	۷۱	۱۲۲	۱۷۸		۴۷۱	۱۰	۸	۷۹	۱۵
TZC-22	624499	4039781	۷	۶۵	۹۲	۰/۵۳۳	۷۳	۳	۲۲	۱	۱۱
TGC4	623608	4039421	۱۱	۷۸	۱۲۷	۰/۰۶۶	۱۲۳	۳۲	۵۸	۱	۳
TGC8	623653	4039302	۲۰	۱۵۶	۱۹۴		۵۰	۱۸	۵۹	۱۳۲	۲۳
TGC12	624034	4039576	۴	۷۹	۱۳۹	۰/۲۷۹	۱۵۷	۲۹	۹	۱	۲
TGC17	624055	4039402	۷	۹۶	۱۳۵		۱۵۳	۸	۴۲	۲۴	۲۳
TGC20	624220	4039269	۱۷	۷۶	۱۱۸		۳۳۹	۱۲	۴۴	۱۱۸	۲۳



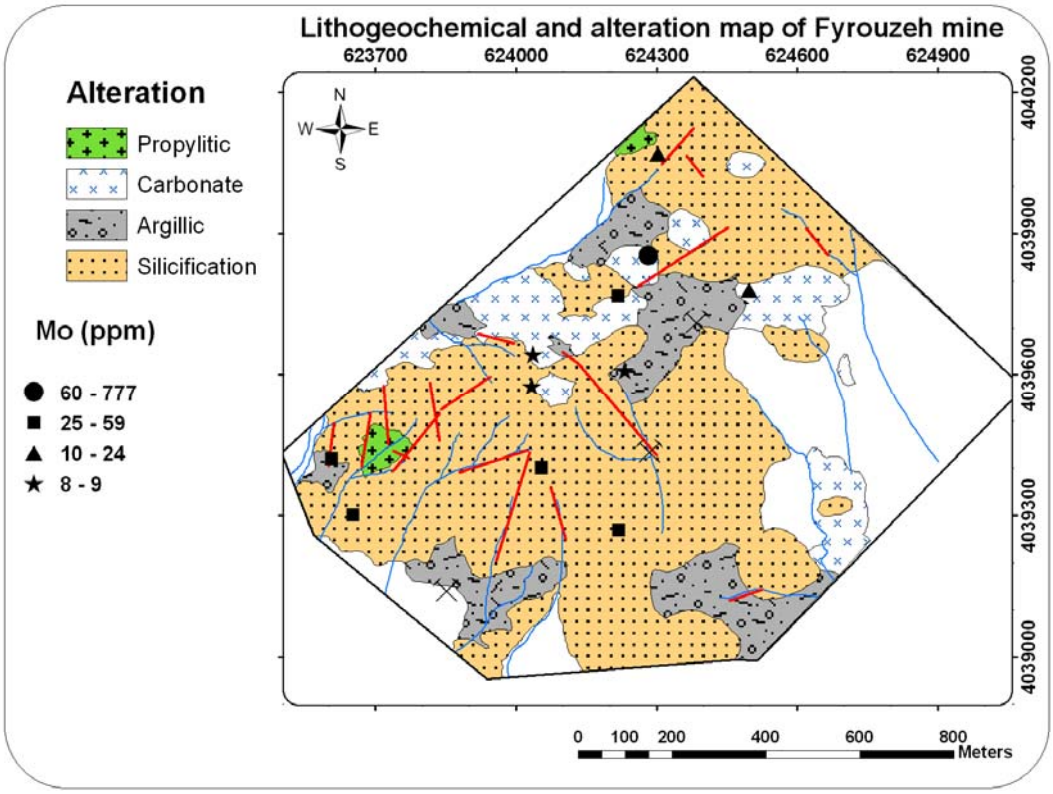
شکل ۱۵. دامنه تغییرات عنصر مس در نمونه‌های خرده‌سنگی در معدن فیروزه نیشابور بر روی نقشه آلتراسیون.



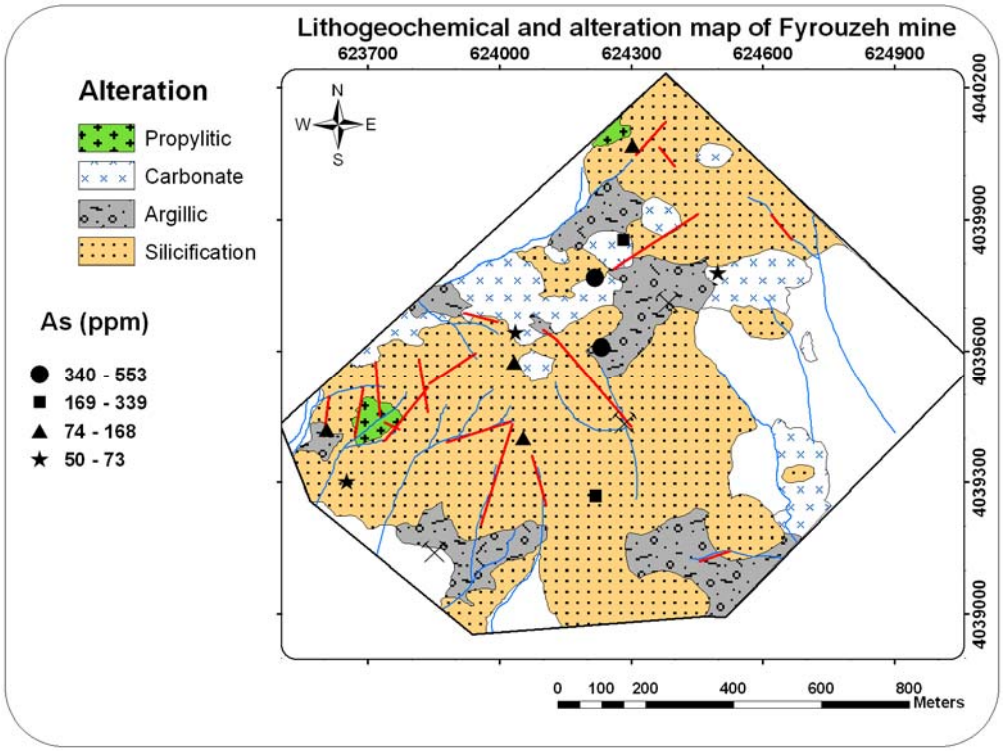
شکل ۱۶. دامنه تغییرات عنصر طلا در نمونه‌های خرده‌سنگی در معدن فیروزه نیشابور بر روی نقشه آلتراسیون.



شکل ۱۷. دامنه تغییرات عنصر نقره در نمونه‌های خرده‌سنگی در معدن فیروزه نیشابور بر روی نقشه آلتراسیون.



شکل ۱۸. دامنه تغییرات عنصر مولیبدن در نمونه‌های خرده‌سنگی در معدن فیروزه نیشابور بر روی نقشه آلتراسیون.



شکل ۱۹. دامنه تغییرات عنصر آرسنیک در نمونه‌های خرده‌سنگی در معدن فیروزه نیشابور بر روی نقشه آلتراسیون.

کبالت: این عنصر از ۱ تا ۱۴۳ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در شمال منطقه همراه با توده سینیت پورفیری و زون آلتراسیون کربناتی دیده می‌شود (شکل ۲۰).

نیکل: این عنصر از ۱ تا ۶۶ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در شمال منطقه همراه با واحد لاتیت و زون آلتراسیون سیلیسی- آرژیلیک دیده می‌شود.

لانتنیم: این عنصر از ۳۲ تا ۱۵۶ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در جنوب‌غربی منطقه همراه با لاتیت و با آلتراسیون سیلیسی- آرژیلیک دیده می‌شود (شکل ۲۱).

سریم: این عنصر از ۵۲ تا ۱۹۴ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در جنوب‌غربی منطقه همراه با لاتیت و با آلتراسیون سیلیسی- آرژیلیک دیده می‌شود.

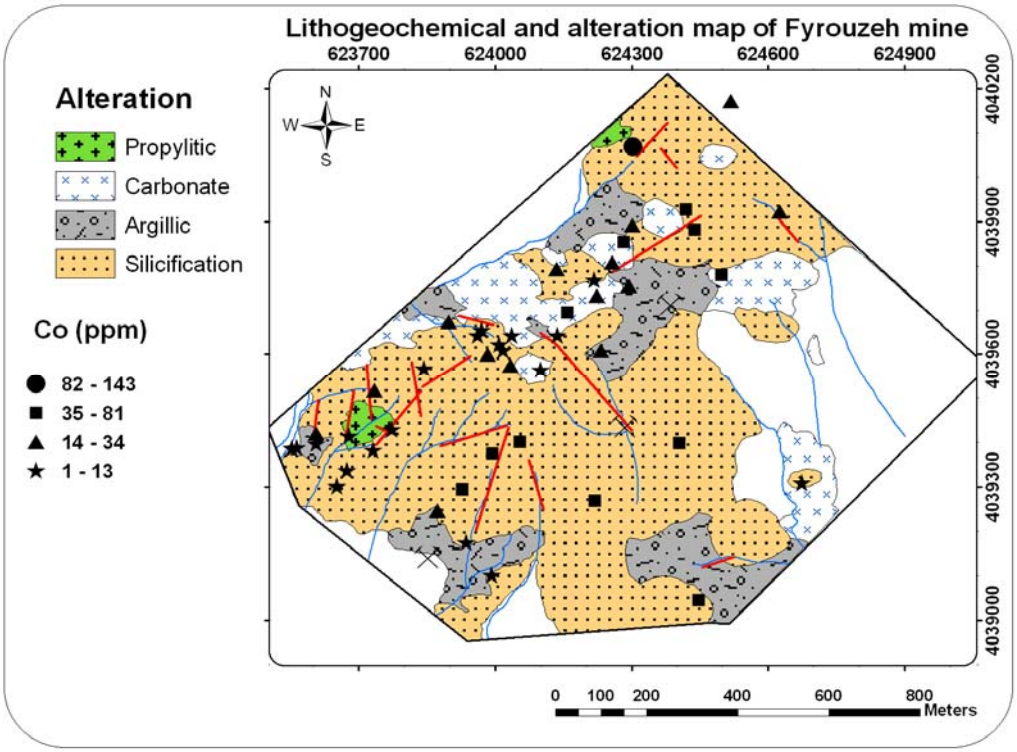
اورانیم: این عنصر از ۱ تا ۳۲ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در مرکز و جنوب‌غربی منطقه همراه با واحدهای لاتیت و در برش گسلی با آلتراسیون‌های سیلیسی- آرژیلیک، آرژیلیک و سیلیسی- کربناته دیده می‌شود (شکل ۲۲).

توریم: این عنصر از ۲ تا ۲۳ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در جنوب منطقه همراه با واحدهای لاتیت، سنگهای به شدت آلتره و در برش گسلی با آلتراسیون‌های سیلیسی- آرژیلیک و سیلیسی دیده می‌شود.

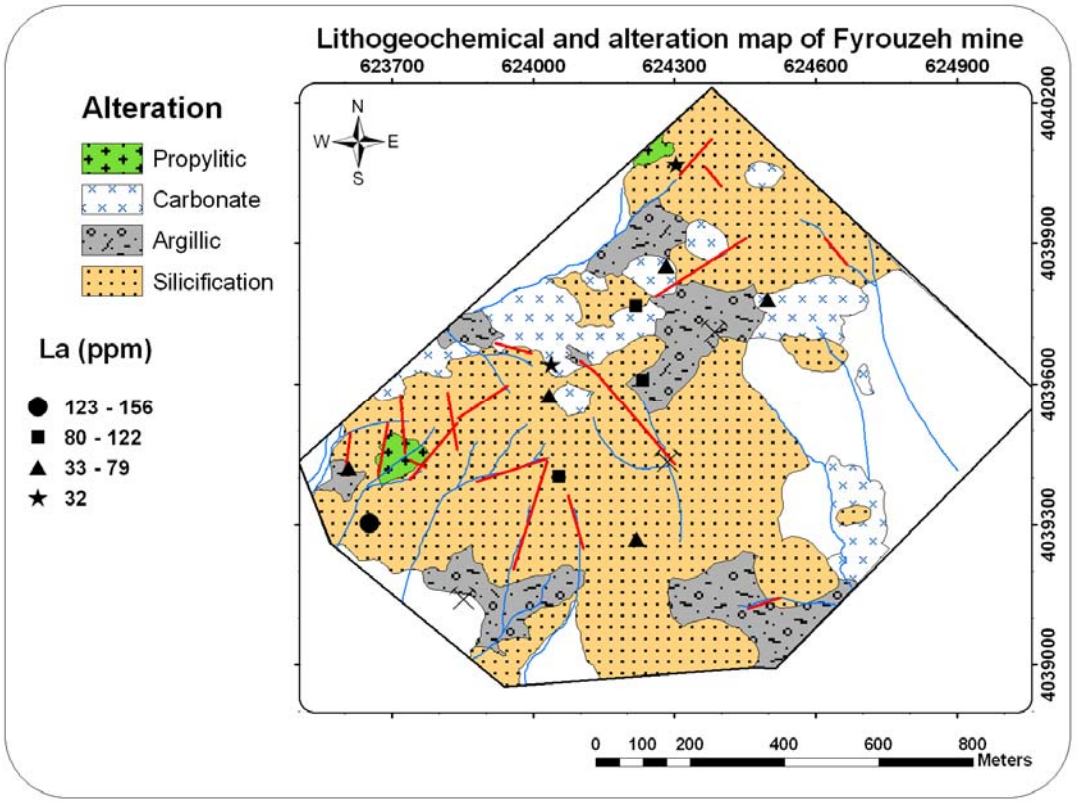
نیوبیم: این عنصر از ۱ تا ۱۳۲ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). بیشترین مقدار آن در جنوب منطقه همراه با لاتیت و سنگهای به شدت آلتره با آلتراسیون‌های سیلیسی و سیلیسی- آرژیلیک دیده می‌شود.

فسفر: این عنصر از ۰/۰۶۶ تا ۰/۵۳۳ درصد متغیر است(جدول ۲).

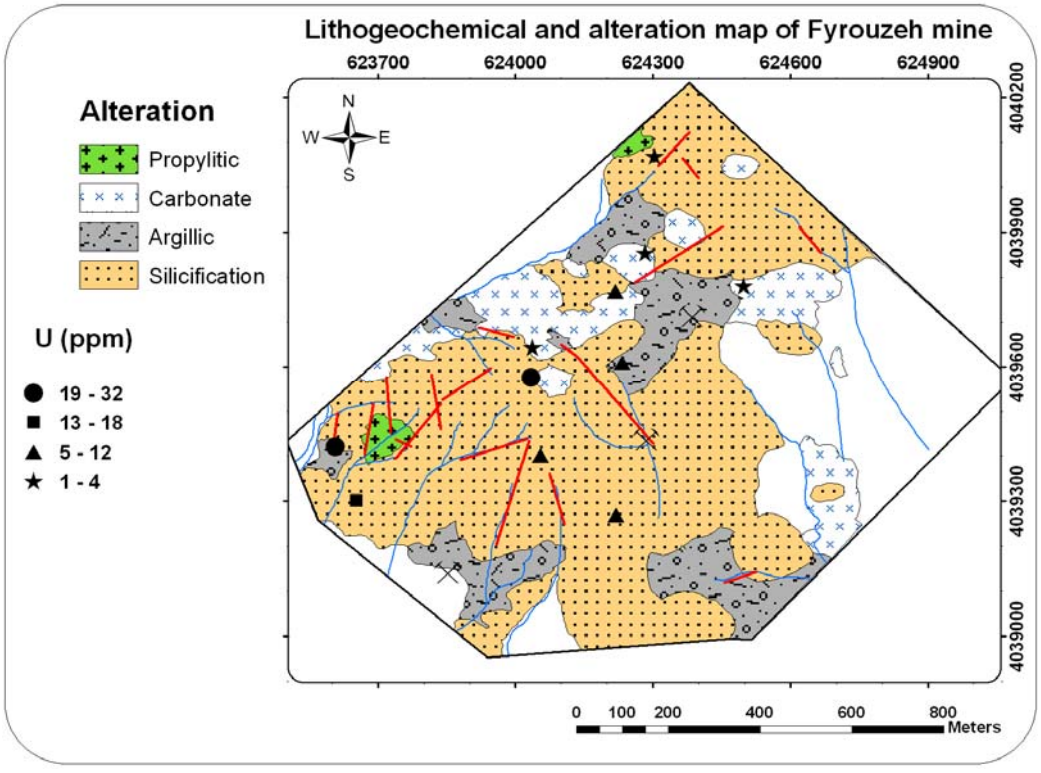
در مجموع ناهنجاریهای مهمی از عناصر مس، طلا، آرسنیک، مولیبدن، روی، عناصر نادر خاکی سبک، اورانیم، توریم، کبالت و نیوبیم در معدن فیروزه نیشابور دیده می‌شود.



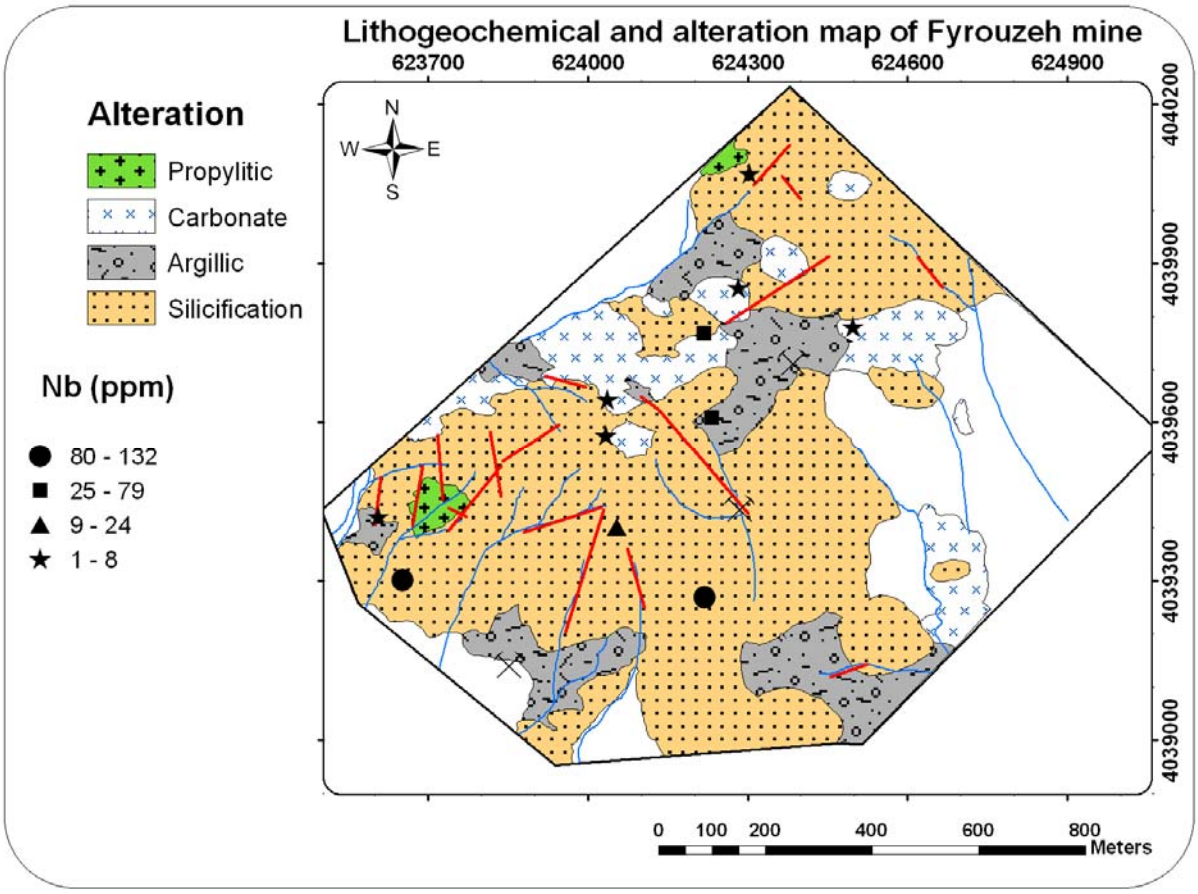
شکل ۲۰. دامنه تغییرات عنصر کبالت در نمونه‌های خرده‌سنگی در معدن فیروزه نیشابور بر روی نقشه آلتراسیون.



شکل ۲۱. دامنه تغییرات عنصر لانتنیم در نمونه‌های خرده‌سنگی در معدن فیروزه نیشابور بر روی نقشه آلتراسیون.



شکل ۲۲. دامنه تغییرات عنصر اورانیم در نمونه‌های خرده‌سنگی در معدن فیروزه نیشابور بر روی نقشه آلتراسیون.



شکل ۲۳. دامنه تغییرات عنصر نیوبیم در نمونه‌های خرده‌سنگی در معدن فیروزه نیشابور بر روی نقشه آلتراسیون.

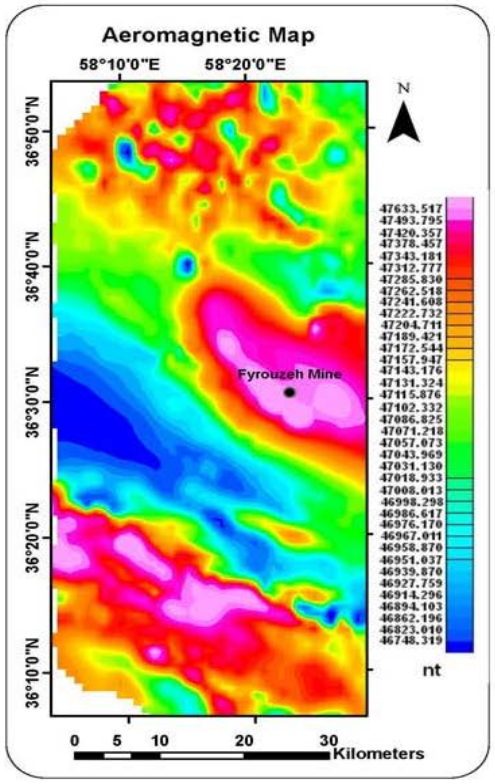
ژئوفیزیک هوایی

امروزه به کارگیری روشهای ژئوفیزیکی در اکتشاف مواد معدنی و انتخاب محلهای مناسب برای اکتشاف، امری متداول به شمار می‌رود. در مرحله پی‌جویی یا گامهای ابتدایی اکتشاف، می‌توان از اطلاعات ژئوفیزیک هوایی برای پیدا کردن ناهنجاریها استفاده کرد و سپس برداشتهای زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی دقیقتر زمینی را در مقیاس بزرگ برای آن منطقه برنامه‌ریزی کرد. با توجه به حضور مگنتیت بالا به عنوان یکی از کانیهای اصلی معدن و ناهنجاری عنصر اورانیم در منطقه، اطلاعات مغناطیس‌سنجی و رادیومتری هوایی برای اکتشاف این ذخیره مهم هستند.

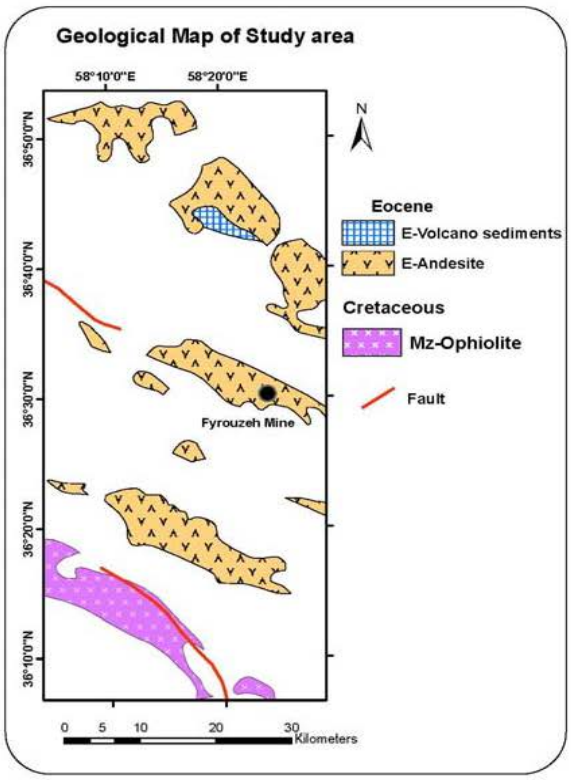
نقشه مغناطیس‌سنجی هوایی(TMI)

این نقشه پس از تصحیح تغییرات روزانه از داده‌های برداشت شده به دست آمده است. حداکثر شدت میدان در این نقشه ۴۷۶۳۳ و حداقل آن ۴۶۷۴۸ نانوتسلا می‌باشد (شکل ۲۴).

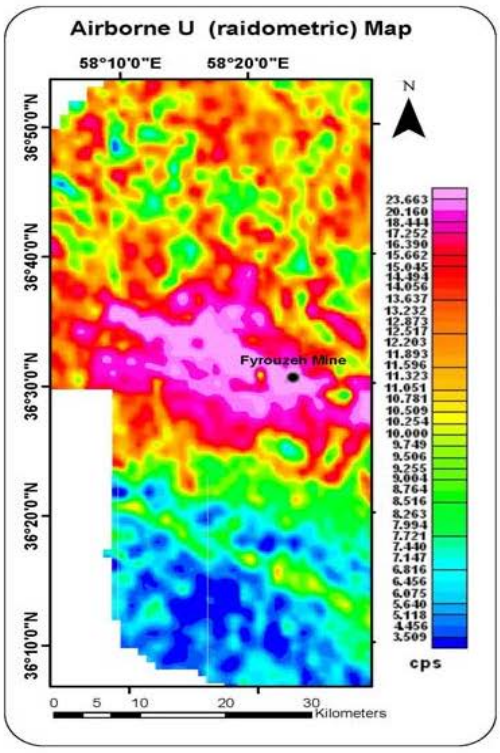
مقایسه این نقشه با نقشه زمین‌شناسی ناحیه‌ای منطقه (شکل ۲۵) نشان می‌دهد که ناهنجاری مغناطیسی بالایی در کمربند آتشفشانی ائوسن میزبان معدن فیروزه با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی و کمربند افیولیتی کرتاسه در جنوب آن دیده می‌شود (شکل ۲۴). ناهنجاری مغناطیسی در کمربند افیولیت مربوط به ماهیت سنگهای الترامافیک و مافیک است، در حالی که ناهنجاری مغناطیسی در کمربند آتشفشانی حدواسط میزبان کانی‌سازی به دو علت می‌تواند باشد: ۱) حضور کانی‌سازی مگنتیت همراه با کانی‌سازی مس که در مطالعات صحرایی- آزمایشگاهی، وجود آن به اثبات رسیده است، ۲) وجود گرانیتوئیدهای سری مگنتیت منشأ و میزبان کانی‌سازی که در مناطق کمتر آلتره دیده می‌شوند. به علت آلتراسیون شدید منطقه در اغلب نقاط، بخش عمده این ناهنجاری مغناطیسی بزرگ مربوط به کانی‌سازی مگنتیت است.



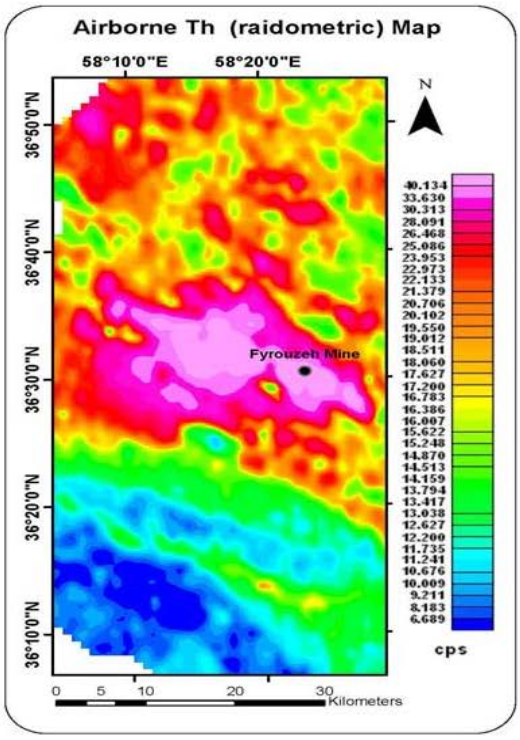
شکل ۲۴. نقشه مغناطیس‌سنجی هوایی در محدوده شمال‌غرب نیشابور



شکل ۲۵. نقشه زمین‌شناسی ناحیه‌ای واحدهای آذرین شمال‌غرب نیشابور



شکل ۲۶. نقشه رادیومتری (اورانیم) در محدوده شمال‌غرب نیشابور



شکل ۲۷. نقشه رادیومتری (توریم) در محدوده شمال‌غرب نیشابور

نقشه اورانیم

این نقشه پس از تصحیحات لازم تولید شده و مقدار U در آن از ۳/۵۰۹ cps تا ۲۳/۶۶۳ cps متغیر است. ناهنجاری بالای اورانیم در کمربند آتشفشانی میزبان کانی‌سازی نسبت به مناطق اطراف، خصوصاً کمربند افیولیتی دیده می‌شود (شکل ۲۶). این مسأله مربوط به حضور اورانیم همراه با کانی سازی مس در آلتراسیون‌های آرژیلیکی- سیلیسی (۱ تا ۳۲ گرم در تن) است. اسپهبد [۲۵] دو ناهنجاری بزرگ اورانیم در شرق و غرب تونل اصلی معدن معرفی کرده است، همچنین در برخی چاهک‌های حفر شده در این مناطق، کانه‌های اورانیم دیده شده است [۲۴].

نقشه توریم

مقدار توریم از ۶/۶۸۹ cps تا ۴۰/۱۳۴ cps متغیر است. ناهنجاری بالای این عنصر در کمربند آتشفشانی میزبان معدن فیروزه نسبت به مناطق اطراف دیده می‌شود (شکل ۲۷). ناهنجاری Th می‌تواند مربوط به وجود این عنصر همراه با کانی‌سازی مس منطقه (۲ تا ۲۳ گرم در تن) و یا ته‌نشینی این عنصر با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در زون گوسان باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

محققان گذشته براساس مطالعات زمین‌شناسی، آلتراسیون، ژئوشیمی و ژئوفیزیکی قدیمی خود در منطقه، معدن فیروزه نیشابور را مربوط به یک کانی‌سازی مس پورفیری احتمالی در عمق دانسته‌اند [۲۲ تا ۲۵]، اما شواهد زیر وجود این نوع ذخیره را در ناحیه رد می‌کند:

۱) نوع زون‌های آلتراسیون و زون‌بندی آنها در محدوده متفاوت است، به نحوی که آلتراسیون سیلیسی به عنوان زون آلتراسیون غالب است و پس از آن آلتراسیون آرژیلیکی حضور چشم گیری دارد. سرسیت در آلتراسیون‌ها همراه با پیریت دیده نشده و زون پروپلیتیک بسیار محدود است، در حالی که در افقهای بالای کانسارهای مس پورفیری معمولاً تا کیلومترها آلتراسیون پروپلیتیک گسترش دارد و در سطوح فرسایشی پایین‌تر نیز بخشهایی از آلتراسیون سرسیتیک بایستی آشکار شود. آلتراسیون سیلیسی نیز فقط منحصر به بخشهای پرتراکم رگ‌چه‌های کوارتز- سولفیدی در ذخایر مس پورفیری است که آن نیز در زون کوارتز- سرسیت- پیریت دیده می‌شود.

۲) حضور مگنتیت بالا در آلتراسیون سیلیسی منطقه که در مغناطیس‌سنجی هوایی نیز خود را به وضوح نشان می‌دهد، در حالی که در کانسارهای مس پورفیری، عمدتاً در نوع دیوریتی مقادیری مگنتیت در زون پتاسیک دیده می‌شود.

۳) وجود رگ‌چه‌های اسپکیولاریت که شرایط اکسیداسیونی بالای محلول کانه‌دار را اثبات می‌کند.

۴) ناهنجاری بالای برخی عناصر مثل عناصر نادر خاکی سبک، اورانیم، توریم، نیوبیم، فسفر، کبالت و نیکل.

شواهد زیر نشان می‌دهد که معدن فیروزه نیشابور می‌تواند یک کانسار بزرگ مس- طلای همراه با اکسید آهن (IOCG) باشد:

۱) ارتباط کانی‌سازی با توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق حدواسط سری مگنتیت یا اکسیدان که بخش کوچکی از آنها در منطقه رخنمون دارند.

۲) گسترش آلتراسیون و کانی‌سازی در یک محدوده وسیع که نشان دهنده یک ذخیره بزرگ است.

۳) مقدار زیاد اکسید آهن در زون اکسیدان که نشان دهنده مقدار زیاد کانیهای سولفیدی در منطقه است.

۴) نوع زون‌های آلتراسیون که غالباً آلتراسیون سیلیسی و پس از آن آرژیلیک در منطقه گسترش دارد. آلتراسیون‌های سدیک و پتاسیک ممکن است در قسمتهای پایین‌تر از تونلها و زون اکسیدان وجود داشته باشد.

۵) شکل کانی‌سازی به حالتهای افشان، استوک‌ورک و برش هیدروترمالی.

۶) کنترل ساختاری بخشهای زیادی از کانی‌سازی رگ‌چه‌ای.

۷) وجود مگنتیت بالا (بیش از ۱۵ درصد) در زون سیلیسی همراه با کانی‌سازی مس.

۸) وجود رگچه‌های اسپکیولاریت در آلتراسیون‌های سیلیسی و آرژیلیک همراه با کانی‌سازی مس.

۹) ناهنجاری بالای مغناطیسی در کمربند آتشفشانی میزبان معدن که به علت حضور کانی‌سازی مگنتیت است.
۱۰) ناهنجاری عناصری مثل طلا، عناصر نادر خاکی سبک، اورانیم، مولیبدن، آرسنیک، فسفر، نیوبیم، روی، توریم و کبالت در منطقه.
۱۱) ناهنجاری رادیومتری هوایی (عناصر اورانیم و توریم) بالا در کمربند آتشفشانی میزبان معدن.
۱۲) وجود معدن فیروزه نیشابور در بخشی از نوار آتشفشانی- نفوذی شمال گسل درونه که قبلاً توسط کریم‌پور [۱۷] به عنوان منطقه با پتانسیل بالا برای کانسارهای نوع اکسید آهن و IOCG معرفی شده است و شواهد زیادی از این نوع ذخایر در آن گزارش شده است مانند کوه‌زر و منطقه سعادت‌آباد رشتخوار.

در جدول (۳) عیار مس و طلا، کانه‌های هیپوژن، سنگ میزبان، توده نفوذی مرتبط، شکل کانی‌سازی، آلتراسیون و فلزات همراه معدن فیروزه نیشابور با معادن بزرگ IOCG دنیا و ایران مقایسه شده است. البته لازم به ذکر است که ویژگیهای معدن فیروزه نیشابور مثل زون‌های آلتراسیون و عیارها فقط براساس بررسیهای سطحی و ناهنجاریهای ژئوشیمی به دست آمده از زون اکسیدان نوشته شده است، در حالی که در دیگر ذخایر، عیارها و آلتراسیون‌ها برپایه مطالعات زیرسطحی است.

مقایسه معدن فیروزه نیشابور با کانسارهای بزرگ IOCG دنیا نشان می‌دهد که این معدن به لحاظ ترکیب کانی‌شناسی هیپوژن (وجود هر دو کانی مگنتیت و اسپکیولاریت همراه با کانی‌سازی مس) و همراهی عناصر نادر خاکی سبک، اورانیم و کبالت شبیه به معدن بزرگ المپیک دم استرالیاست و به دلیل نوع کانه‌های اولیه و بالا بودن عناصر مولیبدن، روی، آرسنیک و عناصر نادر خاکی سبک، شبیه به معدن کاندلاریای شیلی است. در واقع معدن فیروزه نیشابور یک معدن نوع IOCG چندفلزی‌تر نسبت به المپیک دم و کاندلاریا می‌باشد.

همچنین مقایسه معدن فیروزه نیشابور با کانسارهای IOCG شناخته شده کوه‌زر و قلعه‌زری در ایران نشان می‌دهد که به لحاظ همراهی هر دو کانی مگنتیت و اسپکیولاریت با کانی‌سازی مس و وجود ناهنجاریهای عناصر نادر خاکی سبک، اورانیم، مولیبدن، آرسنیک، روی، کبالت، توریم و نیوبیم، این معدن یک کانی‌سازی IOCG چندفلزی متفاوت از آنهاست که برای اولین بار در ایران معرفی می‌شود.

برای تأیید بیشتر این موضوع، مطالعات تفصیلی تونلها، نمونه‌برداری بیشتر از بخشهای کانی‌سازی برای مطالعات تکمیلی مینرالوگرافی، نمونه‌برداری ژئوشیمیایی بیشتر از طبقات مختلف تونلها، حفاری در مناطق مختلف محدوده معدن و مطالعه دقیق پتروگرافی، آلتراسیون، کانی‌سازی و ژئوشیمی مغزه‌ها و بررسیهای ژئوفیزیکی زمینی شامل مغناطیس‌سنجی، رادیومتری و IP/RS در کمربند آتشفشانی ائوسن شمال‌غرب نیشابور برای پیداکردن بخشهای پنهان این نوع کانی‌سازی پیشنهاد می‌شود.

قدردانی

این پروژه با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۲ به شماره ۱۵۶۸۱/۲ مورخ ۱۳۸۹/۷/۱۱ از طرح پژوهه انجام شده است.

جدول ۳. مقایسه ویژگیهای مختلف معدن فیروزه نیشابور با کانسارهای بزرگ IOCG دنیا و ایران.

نام کانسار	%Cu	Au (ppm)	کانه‌های هیپوژن	سنگ میزبان	مهمترین سنگ نفوذی مرتبط	شکل کانی‌سازی	آلتراسیون	فلزات همراه
مانته ورده (شیلی) [۲۹ و ۳۰]	۰/۵۲	۰/۱۱	اسپکیولاریت، مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت	گدازه های آندزیتی -بازالتی	دایک‌های دیوریتی	رگه‌های برشی - دارسنی و برشی مانتو	سیلیسی، پتاسیک ، کلریتی، سرسیت، کربناتی	LREE
کاندلاریا (شیلی) [۳۱ و ۳۲]	۰/۹۵	۰/۲۲	مگنتیت، اسپکیولاریت، پیریت، کالکوپیریت، طلا،	گدازه های آندزیتی - بازالتی	دایک‌های دیوریتی و داسیتی	مانتو- رگه های برشی و دارسنی	پتاسیک ، سیلیسی، اکتینولیت، کلریتی، سرسیتی، کربناتی، آلبیتی	Mo, LREE ,Zn, As
المپیک دم (استرالیا) [۳۳ تا ۳۶]	۱/۶	۰/۶	مگنتیت، اسپکیولاریت، کالکوزیت، بورنیت، کالکوپیریت، پیریت	فلدسپات گرانیت	توده‌های گرانیتی	دیاترم برشی	آرژیلیک، پتاسیک، سرسیتیک، کلریتی، سیلیسی	Co, Ag, U, REE
ارنست هنری (استرالیا) [۳۷]	۱/۱	۰/۵۴	مگنتیت، اسپکیولاریت، پیریت، کالکوپیریت، طلا، سولفاسالت،	آتشفشانیهای مافیک و دیوریت	-	برشی	سیلیسی، پتاسیک، سدیک، کلریتی، کربناتی	Co, Mo, REE
الیانا (پرو) [۳۸]	۲/۷	-	پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت	گابرودیوریت و ولکانوکلاستیک	سیل‌های گرانودیوریتی	مانتو	آمفیبول، اسکاپولیت	As, Zn, Mo, Co
مانته روساس (پرو) [۳۹]	۱/۲	۶	پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت	گابرودیوریت	گابرودیوریت	رگه	اکتینولیت، اپیدوت کلریت، اسکاپولیت	Zn, Co, Mo, Pb
کوه‌زر (ایران) [۴۰]	ناچیز	۵	اسپکیولاریت، باریت، مقادیر جزیی کالکوپیریت، پیریت، گالن	گدازه‌ها و ولکانوکلاستیک- های اسیدی تا حدواسط	مونزونیت تا سینوگرانیت	رگه، رگه- های دارسنی و رگه‌های برشی	سیلیسی، کلریتی، بندرت سرسیتی و آرژیلیک	Ag, W, LREE
قلعه‌زری (ایران) [۱۳ و ۱۸]	۱-۴	۰/۵-۲۵	اسپکیولاریت، پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، سولفاسالت	آندزیت – بازالت و شیل	-	رگه	کلریتی – اپیدوت	Au, Ag, Cu
معدن فیروزه نیشابور (ایران)	۸- ۳۲۲۲	۱- ۷۳	مگنتیت، اسپکیولاریت، پیریت، کالکوپیریت، بورنیت	آندزیت تا تراکیت	دیوریت تا سینیت پورفیری	افشان، استوک- ورک، برشی	سیلیسی، آرژیلیک، کربناتی، بندرت پروپلیتیک	U, Mo, LREE, As, Zn, Co, Nb, Th

منابع

[1] Corriveau L., *"Iron oxide copper-gold (±Ag ±Nb ±P ±REE ±U) deposits: a Canadian perspective"*, In.Goodfellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral

Deposits Division, Special Publication 5 (2007) 265-278.
[2] Hitzman M.W., *"Iron oxides Cu-Au Deposits: What, Where, When and Why"*,In porter, T. M. (Ed.), Hydrothermal Iron oxide copper-gold and related deposits: A Global perspective, Australian mineral foundation, Adelaide (2001) 9-25.
[3] Roberts D. E., Hudson G. R. T., *"The Olympic Dam copper-uranium-gold-silver depositRoxby Downs, South Australia"*, Economic Geology 78 (1983) 799-822.
[4] Hitzman M. W., Oreskes N., Einaudi M. T., *"Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits"*, Precambrian Research 58 (1992) 241-287.
[5] Gandhi S. S., Bell R. T., *"Metallogenic concepts to aid exploration for the giant Olympic Dam-type deposits and their derivatives"in* Maurice, Y. T., ed., Proceedings of the 8th quadrennial international association on the genesis of ore deposits symposium: E. Schweizerbart'scheVerlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany (1993) 787-802.
[6] Kerrich R., Goldfarb R., Groves D., Garwin S., *"The geodynamics of world-class gold deposits: characteristics, space-time distribution and origins"*, Reviews of Society of Economic Geologists 13 (2000) 501-551.
[7] Porter T. M., (editor), *"Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective"*, Volume 1: PGC Publishing, Adelaide (2000) 349 p.
[8] Porter T. M., (editor), *"Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective"*, Volume 2: PGC Publishing, Adelaide, (2002) 377 p.
[9] Ray G. E., Lefebure D. V., *"A synopsis of iron oxide ± Cu ± Au ± P ± REE deposits of the Candelaria-Kiruna-Olympic Dam family"*, British Columbia Ministry of Energy and Mines, Geological Fieldwork 1999, Paper 2000-1 (2000) 267-272.
[10] Groves D. I., Vielreicher N. M., *"The Phalabowra (Palabora) carbonatite-hosted magnetite-copper sulfide deposit, South Africa: An end-member of the iron-oxide copper-gold-rare earth element deposit group?"*,MineraliumDeposita 36 (2001)189-194.
[11] Sillitoe R. H., *"Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view"*, MineraliumDeposita 38 (2003) 787-812.
[12] Barton M. D., Johnson D. A., *"Footprints of Fe-oxide (-Cu-Au) syste*ms*"*, SEG 2004 Predictive Mineral Discovery Under Cover – Extended Abstracts, Centre for Global Metallogeny, The University of Western Australia 33 (2004)112-116.
[13] Karimpour M. H., *"Comparison of QalehZari Cu-Au-Ag deposit with other Iron Oxides Cu-Au (IOCG-Type) deposits & new classification"*, Iranian Journal of Crystallography and mineralogy 13 (2005)165-184.
[14] Groves D. I., Bierlein F. P., Meinert L. D., Hitzman N. W., *"Iron oxide copper- gold (IOCG) deposits through earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distiniction from other epigenetic iron oxide deposits"*, Economic Geology 105 (2010) 641-656.
[15] Gandhi S. S., *"An overview of the Fe oxide-Cu-Au deposits and related deposit types"*, CIM Montreal 2003 Mining Industry Conference and Exhibition, Canadian Institute of Mining, Technical Paper CD-ROM (2003).
[16] Gandhi S. S., *"Magmatic-hydrothermal Fe oxide±Cu±Au deposits: classification for a digital database and an overview of selected districts"*, IAVCEI General Assembly 2004, Pucn, Chile, CD-ROM, Abstracts01a_pt_169 (2004).
[۱۷] کریم‌پور م.ح.، *"کانی‌شناسی، آلتراسیون، سنگ منشأ و محیط تکتونیکی کانسارهای Iron oxides Cu-Au و مثالهایی از ایران"*، یازدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، (۱۳۸۲) ص ۱۸۴- ۱۹۰.
[18] Karimpour M. H., ZawKhin Atkinson W. W., *"Fluid inclusion thermometry, stable isotope geochemistry and genesis of a specularite-rich Cu-Au-Ag deposit, QalehZari mine, Iran"*, Geological Society of America Abstracts. Annual meeting November 5-8, 2001 Boston, USA (2001).
[19] Bauman A., Spes O., Lensch G., *"Strontium isotopic composition of post-ophiolithic tertiary volcanics between Kashmar, Sabzevar and Quchan INE Iran"*, Geodynamic project (geotraverse) in Iran, Final report, Geo. Suv of Iran, Report no.51 (1983).
[20] Spies O., Lensch G., Mihem A., *"*Chemistry of the post-ophiolitic tertiary volcanicsbetweenSabzevar and Quchan/NE-Iran*"*, Geodynamic project (geotraverse) in Iran, Final report, Geo. Suv of Iran, Report no 51 (1983).
[۲۱] قاسمی ح.، صادقیان م.، خانعلی‌زاده ع.، تنها ع.، *" سنگ‌شناسی، ژئوشیمی و سن پرتوسنجی گنبدهای آداکیتی*

پرسیلیس کمان قاره‌ای نئوژن، جنوب قوچان"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۳ (۱۳۸۹) ص ۳۴۷-۳۷۰.

[۲۲] تدین اسلامی، *"گزارش اکتشاف ژئوشیمیایی در حوزه معدن فیروزه نیشابور"*، سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۵۳).

[۲۳] کیمیاقلم، ایرانمنش، *"گزارش اکتشافات ژئوفیزیکی در حوزه معدن فیروژه نیشابور"*، گزارش شماره ۵۱ سازمان زمین شناسی کشور (۱۳۵۳).

[24] Issakhanian V., Espahbod M.R., Nemat L., *"Geological investigation of Radiometric material in the vicinity of the Neyshabur turquoise mine"*, Geol. Surv. Iran, (1973) 16 p.

[25] Espahbod M.R., *"Le district minier de la mine de turquoise de kuh-e-madan (Neychabur, Iran): mineralisationsetcaracferesgeologiques, ge'ochimiques et me'talloge'niques de l'uranium, du cuivre et du molybdeue"*, Theses (Diplome de docteur-ingenieur), Universite de Nancy I. Nancy, France (1976).

[۲۶] اکرمی م.ع؛ عسکری ع؛ *"نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سلطان آباد"*، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۹).

[27] Ishihara S., *"The granitoid series and mineralization"*, Economic Geology 75th Anniv (1981) 458-484.

[۲۸] ملک‌زاده شفارودی الف.، کریم‌پور م.ح.، *"بارزسازی زونهای آلتراسیون در ارتفاعات شمال غربی نیشابور، با استفاده از روش نقشه‌برداری زاویه طیفی بر روی تصاویر سنجنده آستر"*، نخستین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۹).

[29] Vidla T., Lindsay N., Zamora R., *"Geology of the Mantoverde copper deposit, northern Chile: A specularite-rich, hydrothermal- tectonic breccia related to the Atacama Fault Zone"*, In: Camus F, Sillitoe RH, Petersen R (eds) Andean copper deposits: New discoveries, mineralization styles and metallogeny, Soc Econ Geol, Spec Publ,5 (1996) 157–169.

[30] Zamora R., Castillo B.,*"Mineralizacio´ n de Fe-Cu-Au en el distritoMantoverde, Cordillera de la Costa, III Regio´n de Atacama, Chile"*, In: Proc 2nd CongrInt de Prospectores y Exploradores, Lima, Conferencias, Inst de Ingenieros de Minas del Peru´, Lima, (2001) 13.

[31] Marschik R., Leveille R.A., Martin W., *"La Candelaria and the Punta del Cobre district, Chile, Early Cretaceous iron oxide Cu-Au(-Zn-Ag) mineralization"*, In: Porter TM (ed)Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits, A global perspective, Australian Mineral Foundation, Adelaide 1 (2000) 163–175.

[32] Marschik R., Leveille R.A., *"The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide copper-gold deposits, Chile"*, Geological Society of America, Abstracts with Programs, A-371 (1998).

[33] Reeve J.S., Cross K.C., Smith R. N., Oreskes N., *"Olympic Dam copper-uranium-gold-silver deposit"*, In: Hughes FE (ed) Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea, 2. AustInst Min MetallMonogr14 (1990) 1009–1035.

[34]Hodgkison J., *"Olympic Dam – Expanding and Changing the Geological Interpretations of a Major Deposit and Its Implications"*, Technology – Australia's Future: New Technology for Traditional Industries: Academy Symposium, (1998).

[35]Haynes D., Cross K., Bills R., Reed M., *"Olympic Dam Ore Genesis. A Fluid-Mixing Model"*, Economic Geology 90 (1995) 281-307.

[36]Oreskes N., Hitzman M.W., *"A model for the origin of Olympic Dam-type deposits"*, Mineral deposit modeling, Gelogical Association of Canada, Special paper 40 (1993).

[37] Crask T.E., *"Geological aspects of discovery of the Ernest Henry Cu-Au deposit"*, northwest Quinsland: Australian Institue of Geoscientists Bull, 16 (1995) 95-109.

[38] Vidal C.E., Injoque-Espinoza J., Sidder G.B., Mukasa S.B., *"Amphibolitic Cu-Fe skarn deposits in the central coast of Peru"*, Econ Geol. 5 (1990) 1447–1461.

[39] Leveille R., Marschik R., *"Iron oxides copper-gold deposits in south America"*, International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil, August (2000) 6-17.

[۴۰] مظلومی ع.، کریم‌پور م.ح.، رسا الف.، رحیمی ب.، وثوقی عابدینی م.، *"کانسار طلای کوه‌زر تربت حیدریه مدل جدیدی از کانی‌سازی طلا"*، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران شماره ۳ (۱۳۷۸) ص ۳۶۴-۳۷۶.