زمین‌شناسی و کانی‌شناسی پگماتیت‌های جنوب مشهد با نگرشی ویژه بر کانی‌سازی لیتیم

پژواک دیدار [۱*]، نیما نظافتی [۲]، محمدهاشم امامی [۳] و علی سلگی [۲]

[۱] دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
[۲] استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
[۳] دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اسلامشهر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۹

چکیده

گرانیت‌های جنوب مشهد به مساحت تقریبی ۴۰ کیلومترمربع در استان خراسان رضوی قرار دارند. این به گرانیت‌ها از نوع S، پرآلومین و از نظر خاستگاه زمین‌ساخت ماگمایی از نوع برخوردی و کوهزایی هستند که میزبان پگماتیت‌هایی هستند که آنها را قطع کرده‌اند. در این نوشتار نتایج بررسی‌ها، روی پگماتیت‌های موجود در این گرانیت‌ها از نظر کانی‌سازی لیتیم پرداخته است. پگماتیت‌های جنوب مشهد که از نوع ساده (غیر پیچیده) هستند، ۷ رخساره پگماتیتی تشخیص داده شد که همگی این رخساره‌ها از نوع LCT (لیتیم- سزیم- تانتالیم) هستند. میکاهای این پگماتیت‌ها از نوع لپیدولیت - مسکوویت و بیوتیت بوده که مقادیر Li در این میکاها بالاست و حدوداً به‌طور میانگین میان ۲۱۴۵ppm تا ۵۷۴۵ متغیر است. گارنت‌های درون پگماتیت‌ها، از نوع آهن- منگنزدار (آلماندن- اسپسارتین) است به رنگ سرخ- قهوه‌ای در نمونه دستی دیده می‌شوند. تورمالین‌های درون این پگماتیت‌ها بیشتر از نوع سری شورل- دراویت و البائیت- شورل هستند که در نمونه دستی به رنگ تیره دیده می‌شوند. آپاتیت‌های این پگماتیت‌ها ریزدانه و از نوع هیدروکسی آپاتیت و به مقدار کمتر فلوئورآپاتیت هستند. میانگین شاخص A/CNK در این پگماتیت‌ها، ۱/۳ تا ۱/۶ و میانگین نسبت Mg/Li، ۰/۸ الی ۱۰/۹ است. میانگین فراوانی مقادیر Li در این پگماتیت‌ها، ۹۶/۵ ppm در رخساره "کوارتز+ تورمالین± مسکوویت" و ۸۸۶ ppm در رخساره "کوارتز+ فلدسپار پتاسیک+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ گارنت" است. با توجه به‌مطالعات صورت گرفته در سطح رخنمون‌ها، پگماتیت‌های مورد مطالعه دارای مقادیر کم Mg/Li، مقادیر بالای لیتیم و کانی‌سازی لپیدولیت بوده و از نظر کانی‌زایی لیتیم، دارای پتانسیل مناسبی هستند.

کلیدواژه‌ها: پگماتیت، لیتیم، لپیدولیت، گرانیت، جنوب مشهد.

***نویسنده مسئول:** پژواک دیدار
E-mail: pezhwakdidar@gmail.com

۱- پیش‌گفتار

امروزه نیاز صنعت به‌مواد خام در حال تغییر است ولی به‌طور کلی افزایش تقاضا برای موادی با خواص ویژه و تکنولوژی‌های پیشرفته (High-Technology)، لزوم ارزیابی دوباره دوره‌ای از منابع زمین‌شناسی، با توجه به تکنولوژی آینده از فلزات و کانی‌های Hi-Tech موجود در آنها را آشکار می‌سازد. به‌طور نسبی تجارت کوتاه مدت برای کالاهای منحصر بفرد نمی‌تواند مبنای بی‌نقصی برای اکتشافات زمین‌شناسی ارائه دهد. یکی از منابع کلاسیک از فلزات و کانی‌های Hi-Tech، گرانیت - پگماتیت‌ها هستند که از آنها عناصری همچون لیتیم به‌دست می‌آید. با وجود رقابت میان کانه‌زایی گرانیت‌ها و دیگر انواع کانسارهای کم عیار با حجم زیاد جدید، پگماتیت‌ها به‌طور قابل توجهی جایگاه خود را در میان منابع فلزی Hi-Tech، حفظ کرده‌اند.

لیتیم یکی از پر کاربردترین فلزات در صنایع مختلف از جمله پزشکی، داروسازی، الکترونیک، صنایع نظامی، خنک کننده‌های راکتورهای هسته‌ای، صنایع سرامیک، شیشه و آلیاژهای هوا فضاست. عمده‌ترین کانی‌های لیتیم عبارتند از: اسپودومن، آمبلیگونیت، لپیدولیت و پتالیت که همگی آنها به دسته آلومینوسیلیکات‌ها تعلق دارند.

گرانیت‌های نوع S بارور پرآلومین تولید پگماتیت‌های LCT (لیتیم- سزیم- تانتالیم) می‌کنند که از طریق ذوب بخشی از سنگ‌های پوسته میانی/بالایی تحت اولین آناتکسی به‌وجود می‌آیند و پگماتیت‌ها معمولاً زون‌بندی منطقه‌ای از خود نشان می‌دهند. این پگماتیت‌های نوع LCT، در بیشتر مناطق دارای غنی‌شدگی از عنصر لیتیم است و منابع مناسبی برای استخراج و بهره‌برداری از عنصر لیتیم هستند (Černý,1989a).

پگماتیت‌ها از نظر کانی‌شناسی دارای دو نوع همگن و ناهمگن هستند که پگماتیت‌های همگن، به استثنای برخی جاها که از نظر Li، فلدسپار یا میکا مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، ارزش اقتصادی چندانی ندارند (Gilbert & Park,1997). نظر به این که تا کنون مطالعه فراگیری به‌صورت مشخص روی پگماتیت‌های جنوب مشهد با توجه به کانی‌زایی لیتیم در آنها صورت نگرفته است بنابراین این مقاله به‌بررسی زمین‌شناسی و کانی‌شناسی پگماتیت‌های جنوب مشهد با توجه ویژه به کانه‌زایی لیتیم در آنها می‌پردازد.

۲- زمین‌شناسی صحرایی

گستره مورد مطالعه به مساحت تقریبی ۴۰ کیلومتر مربع ، در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشهد در بخش جنوبی شهر مشهد میان طول و عرض جغرافیایی ″۳۲ °۵۹ و ″۴۶ °۵۹ و ″۰۰ °۳۶ تا ″۳۶°۱۳′۶۳ شمالی قرار دارد (شکل ۱). این محدوده از جنوب مشهد شروع شده و در امتداد جاده نیشابور به‌سوی جنوب ادامه دارد که به‌شکل یک چهار گوش در روی نقشه (شکل۱) ملاحظه می‌شود. با توجه به مطالعات پیشین توسط Majidi (1978)، میرنژاد (۱۳۷۰)، طاهری و قائمی (۱۳۷۳)، ولی‌زاده و کریم‌پور (۱۳۷۴)، دیدار (۱۳۸۲) ، کریم‌پور و همکاران (۱۳۹۰) و Karimpour et al. (2009) گرانیت‌های منطقه به‌سه گروه gr^1,gr^2,gr^3 تقسیم می‌شوند. گرانیت‌های gr^1 از نوع گرانیت‌های تیره‌رنگ (ملانوکرات) بیوتیت‌دار هستند که رستیت‌های تیره رنگی با روندهای N35 در آنها دیده می‌شوند. این گرانیت‌ها به لحاظ شیمیایی گرانیت نوع S، کالک‌آلکالن و فوق اشباع از آلومینیم هستند (دیدار، ۱۳۸۲؛ Karimpour et al., 2009). بر پایه سن سنجی به‌روش U-Pb در کانی زیرکن سن این گرانیت‌ها تریاس بالایی (۲۱۰ میلیون سال) است (Karimpour et al., 2009). گرانیت‌های gr^2، روشن‌تر از گرانیت‌های gr^1 است و در آنها بیوتیت کمتر دیده می‌شود، همچنین در آنها رستیت‌های تیره جهت‌دار نیز دیده نمی‌شود. این گرانیت‌ها از نظر سنی جوان‌تر از گرانیت‌های gr^1 هستند و هم‌زمان با فاز کوهزایی سیمرین نفوذ کرده‌اند. این گرانیت‌ها از نوع S و کالک‌آلکالن هستند و ماگمای این توده‌ها از ژرفای کمتر پوسته قاره‌ای منشأ گرفته‌اند. (ولی‌زاده و کریم‌پور، ۱۳۷۴). گرانیت - پگماتیت‌های gr^3 بیشتر شامل مونزوگرانیت‌های ارتوکلازدار درشت‌دانه و گرانیت - پگماتیت‌ها و سنگ‌های در حال گرانیتیزاسیون هستند که بافت سنگ

مادر اولیه در آنها نمایان است. همچنین رستیت‌هایی به‌صورت پراکنده و با ابعاد بزرگ در تمام این گرانیت – پگماتیت‌ها دیده می‌شوند. این گرانیت – پگماتیت‌ها تمام بلورین، درشت‌دانه و به‌رنگ صورتی روشن (به‌علت حضور ارتوکلازهای درشت بلورصورتی) و از نظر شیمیایی فوق آلومین و از نوع S کالک‌آلکالن هستند (دیدار،۱۳۸۲ و کریم‌پور و همکاران، ۱۳۹۰). سن این گرانیت‌ها با استفاده از روش U-Pb زیرکن، تریاس بالایی (۴/۱ ± ۲۰۵/۹ Ma) تعیین شده است (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۹۰).

پگماتیت‌های جنوب مشهد در درون گرانیت‌ها منطقه قرار گرفته و آنها را قطع می‌نمایند. این پگماتیت‌ها، همگن و از نظر کانی‌شناسی ساده و فاقد منطقه‌بندی هستند. آنها عمدتاً از بلورهای درشت کوارتز و فلدسپار با مقداری میکا تشکیل شده‌اند و معمولاً از نظر ترکیب و بافت، از یک دیواره تا دیواره دیگر یکنواخت هستند.

این پگماتیت‌ها به‌صورت ضربدری همدیگر را قطع می‌کنند (شکل۱). این رگه‌های پگماتیتی دارای دو روند اصلی شمال خاور- جنوب باختر (N30) و شمال باختر – جنوب خاور (N120) هستند. شیب رگه‌های پگماتیتی در برخی از مناطق حدود ۴۵ تا ۹۰ درجه است. پهنای این رگه‌های پگماتیتی متفاوت است و از ۱۰ سانتی‌متر تا ۱۵۰متر متغیر هستند. بیشترین تراکم و فراوانی این پگماتیت‌ها در گرانیت‌های gr^3 و gr^2 و کمترین فراوانی آنها درگرانیت‌های gr^1 است (این پگماتیت‌ها در گرانیت‌های gr^3 دارای بیشترین تراکم است به‌گونه‌ای که گرانیت‌های gr^3 را باید با نام گرانیت – پگماتیت معرفی کرد). در گرانیت‌های gr^1 با حرکت از شمال به‌سوی جنوب و دورتر شدن از گرانیت gr^2 این فراوانی کمتر هم می‌شود، به‌گونه‌ای که در حاشیه‌های جنوبی این گرانیت‌ها، تراکم پگماتیت‌ها بسیار کم شده و به‌سوی نبود پگماتیت‌ها پیش می‌رود. در حاشیه شمالی گرانیت‌های gr^2 نیز تراکم پگماتیت‌ها نسبت به‌مرکز و جنوب این گرانیت‌ها کمتر است. از نظر پهنا عریض‌ترین پگماتیت‌ها در مرکز و جنوب گرانیت‌های gr^2 و درون پگماتیت – گرانیت‌های gr^3 دیده می‌شوند و هرچه به‌حاشیه جنوبی و شمالی کل توده گرانیتی gr^1 و gr^2 نزدیک می‌شویم عرض این پگماتیت‌ها کمتر می‌شوند.

این پگماتیت‌ها از نظر ترکیب کانی‌شناسی (در نمونه‌های دستی) شامل ۷ رخساره متفاوت هستند که عبارتند از:

- فلدسپار (صورتی – سفید رنگ) + کوارتز + میکا (کتابی شکل یا پرمانند)
- فلدسپار(صورتی رنگ) + کوارتز
- فلدسپار (سفید یا صورتی رنگ) + کوارتز – میکا (کتابی شکل) + تورمالین سیاه (میله ای شکل یا شعاعی)
- فلدسپار (صورتی رنگ) + کوارتز + میکا (کتابی شکل) + تورمالین سیاه (میله‌ای شکل) + گارنت قرمز- قهوه‌ای
-فلدسپار (سفید تا صورتی رنگ) + کوارتز +میکا (کتابی شکل) + گارنت قرمز-قهوه‌ای
- فلدسپار (صورتی رنگ) + کوارتز + میکا (کتابی شکل) + بریل سبز-آبی رنگ
- کوارتز + تورمالین سیاه

۳–سنگ‌نگاری

پگماتیت‌های منطقه را با توجه به مطالعات سنگ‌نگاری می‌توان به ۷ رخساره زیر رده‌بندی کرد:

۱- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتوکلاز + میکروکلین)+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ بیوتیت

۲- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتوکلاز + میکروکلین)+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ بیوتیت+ تورمالین

۳- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتوکلاز + میکروکلین)+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ تورمالین

۴- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتوکلاز + میکروکلین)+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+تورمالین+ گارنت

۵- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتوکلاز + میکروکلین)+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ گارنت

۶- کوارتز + تورمالین ± مسکوویت

۷- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتوکلاز + میکروکلین)+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ بریل

بافت رخساره‌های بالا همه پگماتوییدی و پورفیریتیک بوده و در همه رخساره‌ها به استثنای رخساره ۶ بافت میرمکیتی و پرتیتی (زمینه فلدسپار پتاسیک همراه با رگه‌های پلاژیوکلاز در آن) دیده می‌شود (شکل۲).

در رخساره‌هایی که بیوتیت دیده می‌شود (رخساره‌های شماره ۱ و۲) این بیوتیت در حال دگرسانی به کلریت و مسکوویت است (شکل۳) و بنابراین مسکوویت موجود دارای دو نسل مسکوویت‌های اولیه و ثانویه (حاصل دگرسانی) است. در رخساره شماره ۲ بیوتیت‌ها بر اثر متاسوماتیزم بوردار به‌تورمالین (تورمالینیزاسیون) تبدیل شده‌اند. در همه رخساره‌ها (به‌استثنای شماره۶) میکروکلین‌ها غیر آلتره هستند ولی ارتوکلازها تا حدودی سریسیتی شده‌اند (شکل۴). در این رخساره‌ها آپاتیت نیز دیده می‌شود. پلاژیوکلازها از نوع سدیک بوده که تا حدودی سریسیتی و سوسوریتی شده‌اند.

۴–ژئوشیمی کانی‌ها

به‌منظور مطالعه ژئوشیمیایی کانی‌های پگماتیتی ۲۵ نمونه از کانی‌های فلدسپار و میکا برای تجزیه ICP-OES و ICP-MS و ۷۲ نمونه از نمونه‌های سنگی پگماتیتی و گرانیتی نیز برای مطالعات ژئوشیمی به آزمایشگاه‌های مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور ارسال شد. به‌منظور مطالعه کانی‌شناسی، ۸۶ نمونه برای تجزیه XRD و ۲۰ نمونه برای بررسی نقطه‌ای SEM نیز به‌آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور ارسال شد. در پایان پس از انجام تجزیه‌های مربوط با استفاده از داده‌های به‌دست آمده و نرم‌افزارهای رایانه‌ای، نمودارهای ژئوشیمیایی مختلف رسم و تحلیل شد.

تبلور یک مذاب گرانیتی و تفریق آن سبب غنی‌شدن کانی‌ها از عناصر کمیاب (همانندLi, B, Be, Rb, Cs, Nb, Ta, Mn, F) می‌شود (Černý,1989a)، به‌عنوان مثال، فلدسپار پتاسیک و مسکوویت از روبیدیم و سزیم غنی می‌شوند، گارنت از منگنز و آپاتیت از F غنی می‌شود. افزایش تفریق نیز در تبلور کانی‌های دارای Be, B, Li, Ta و Cs مؤثر است (Černý,1989a).

همان‌گونه که در بخش‌های پیش بیان شد پگماتیت‌های منطقه دارای کانی‌های اصلی کوارتز، فلدسپار پتاسیک، پلاژیوکلاز، میکا، گارنت و تورمالین هستند که بر پایه حضور، نبود و یا فراوانی برخی از این کانی‌ها انواع مختلفی از رخساره‌های پگماتیتی در منطقه طبقه‌بندی شدند.

از آنجایی که برخی از این کانی‌های اصلی نقش مهمی در کانه‌زایی و طبقه‌بندی این پگماتیت‌ها دارند بنابراین در ادامه به‌شرح برخی از کانی‌های شاخص که برای شناسایی پگماتیت‌های نوع عناصر کمیاب (Rare-Earth Pegmatites) مورد استفاده قرار می‌گیرند، پرداخته می‌شود.

۵–فلدسپارها

بررسی فلدسپارهای پتاسیک درشت‌بلور یک ابزار اکتشافی بسیار عالی است زیرا که این کانی در گرانیت بارور و پگماتیت‌های نوع عناصر کمیاب بارور دیده می‌شود (Černý et al.,1981).

فلدسپارهای پتاسیک متمایل به صورتی و متوسط‌دانه درون گرانیت‌های نابارور

دیده می‌شوند در حالی که فلدسپارهای پتاسیک درون پگماتیت‌های پتاسیک و پگماتیت‌های نوع عناصر کمیاب مایل به سفید و درشت‌دانه (اندازه بیش از ۵ سانتی‌متر) هستند. همرشدی گرافیکی فلدسپار پتاسیک و کوارتز در گرانیت‌ها و پگماتیت‌های بارور رایج است (Černý,1989a).

در کل می‌توان رنگ فلدسپارهای انواع رخساره‌های پگماتیتی منطقه را به صورت زیر بیان کرد.

- رخساره‌های "کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت"، " کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + گارنت" و " کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت+ بیوتیت+ تورمالین" دارای فلدسپار عمدتاً صورتی درشت دانه هستند.
- رخساره‌های "کوارتز + فلدسپار پتاسیک+ پلاژیوکلاز + مسکوویت+ لپیدولیت+ گارنت+ تورمالین" و " کوارتز + فلدسپار پتاسیک+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ تورمالین" به‌طور عمده دارای فلدسپارهای سفید رنگ متوسط بلور هستند.

البته گفتنی است که در برخی مناطق، پگماتیت‌های با رخساره «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + گارنت» و رخساره «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت» دارای فلدسپارهای سفید رنگ و در برخی موارد درشت بلور هستند که البته فراوانی آنها نسبت به کل پگماتیت‌های رخساره یاشده، کم است.

رخساره "کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین" نیز در برخی از نقاط دارای فلدسپارهای با رنگ صورتی و درشت دانه است، که در این جا نیز فراوانی آنها نسبت به کل تعداد انواع پگماتیت‌ها با فلدسپار سفید کم است.

با توجه به‌مطالعات صورت گرفته با روش‌های مطالعه مقاطع نازک، XRD و SEM، فلدسپارهای پتاسیک درون پگماتیت‌های منطقه از نوع میکروکلین و ارتوکلاز و پلاژیوکلازها نیز از نوع آلبیت هستند.

نمودار K/Rb در برابر Cs برای فلدسپارهای پتاسیک یکی از نمودارهای استاندارد برای ارزیابی درجه تفریق پگماتیت است (Černý,1989a). اندازه‌گیری نسبت K/Rb برای تعیین درجه جایگزینی روبیدیم به‌جای پتاسیم در ساختار بلوری فلدسپار پتاسیک است (جدول۱).

در نمودار K/Rb-Cs ارائه شده توسط Černý (1989a) برای تعیین پتانسیل اقتصادی پگماتیت‌ها برای عناصر بریلیم، بریلیم-تانتالیم و لیتیم-سزیم- بریلیم-تانتالیم، همان‌گونه که دیده می‌شود تنها برخی از نمونه‌های فلدسپاری رخساره‌های « کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + گارنت» و « کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت» که از نظر سزیم دارای بیشترین مقادیر بودند در محدوده کانه‌زایی بریلیم واقع شده و ارزش اقتصادی دارند و بقیه نمونه‌ها در محدوده عقیم از این عناصر واقع شده‌اند (شکل ۵).

۶-میکاها

بررسی نمونه مسکوویت‌های کتابی شکل (Muscovite books)، یک ابزار اکتشافی بسیار عالی است زیرا که آنها در هر دو گرانیت بارور و پگماتیت‌های عناصر کمیاب ظاهر می‌شوند و آن را به‌عنوان یک شاخص بسیار خوب برای کانه‌زایی تانتالیم می‌دادند (Gordiyenko,1971; Černý,1989a; Morteani & Gaupp,1989). این روش محدود به مسکوویت‌های کتابی شکل درشت می‌شود که ممکن است این مسکوویت‌ها در گرانیت‌های عقیم دیده نشوند.

رنگ و اندازه دانه‌های مسکوویت با افزایش تفریق تغییر می‌کند (Černý,1989a)، مسکوویت‌های گرانیت‌های عقیم دارای گرایش به نقره‌ای و دانه متوسط هستند در حالی که مسکوویت در گرانیت‌ها و پگماتیت‌های بارور دارای تمایل به رنگ سبز و درشت دانه (بیشتر از ۲ سانتی‌متر در طول و عرض) هستند. مسکوویت‌های سبز معمولاً دارای یک ترکیب مسکوویت لیتیم‌دار (Lithian = مسکوویت لیتیم‌دار که دارای منگنز ۳ ظرفیتی و آهن دو ظرفیتی در غیاب آهن سه ظرفیتی است) هستند. در پگماتیت‌های بسیار تفریق یافته، مسکوویت سبز ممکن است دارای هاله نازکی از لپیدولیت باشد. با افزایش تفریق، ترکیب میکای سبز لیتیم‌دار (Lithian) به لپیدولیت بنفش تغییر خواهد کرد (Černý, 1989a).

همه میکاها و مسکوویت‌های درون پگماتیت‌های منطقه به‌رنگ سفید – نقره‌ای تا سبز کمرنگ بوده و به شکل‌های مختلفی از جمله شعاعی، دم چلچله‌ای، میله‌ای و کتابی کوچک اندازه (زیر ۲ سانتی‌متر در طول و عرض) دیده می‌شوند.

با توجه به نتایج مطالعات XRD میکاهای این پگماتیت‌ها از نوع مسکوویت و لپیدولیت است که این دو میکا همزمان با هم در این پگماتیت‌ها دیده می‌شوند (البته در ۲ رخساره شماره ۱ و ۲ بیوتیت هم دیده می‌شود).

۵ عنصر کلیدی در تجزیه و تحلیل نمونه‌های درشت مسکوویتی عبارتند از لیتیم، پتاسیم، روبیدیم، سزیم و تانتالیم. بالا رفتن مقادیر لیتیم، روبیدیم و سزیم نشان‌دهنده این است که مسکوویت از پگماتیت نوع عناصر کمیاب حاصل آمده است. مقادیر لیتیم برای مسکوویت درون گرانیت بارور بیش از ppm ۲۰۰ است در حالی که مقادیر لیتیم مسکوویت‌های پگماتیت‌های اسپودومن‌دار معمولاً بیش از ppm ۱۰۰۰ است (که این مقدار در پگماتیت‌های نوع لپیدولیت‌دار کمتر است) (Černý,1989a). بسیاری از پگماتیت‌های نوع عناصر کمیاب با پتانسیل اقتصادی، دارای مقادیر بالایی از لپیدولیت اولیه و بیوتیت‌هایی با هاله‌های متاسوماتیکی غنی از لیتیم، روبیدیم و سزیم هستند، که زمانی متبلور شده‌اند که مایعات پگماتیتی به سنگ میزبان مهاجرت کرده‌اند (Černý,1989a).

همان‌گونه که در جدول۲ نیز مشخص است میزان میانگین لیتیم در میکاهای درون رخساره «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت» در حدود ppm ۵۷۴۵ بوده و در رخساره "کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین" این میانگین نزدیک به ppm ۲۱۴۵ است.

۷-تورمالین

کانی تورمالین شاخص بسیار عالی برای اکتشاف پگماتیت‌های بارور است زیرا که تغییرات رنگ و ترکیب در آن با افزایش تفریق تغییر می‌کند به‌گونه‌ای که گرانیت بارور دارای تورمالین غنی از آهن سیاه رنگ (شورل) است و زون‌های درونی‌تر از پگماتیت‌های نوع عناصر کمیاب ممکن است دارای تورمالین صورتی، سبز و آبی غنی از لیتیم (البائیت) باشند. شورل سیاه رایج‌ترین گونه از تورمالین در پگماتیت‌ها و گرانیت‌های بارور است. همان‌گونه که یک مذاب پگماتیتی متبلور می‌شود، از آهن رقیق و از لیتیم غنی می‌شود و ترکیب تورمالین تغییر کرده و از شورل به سوی البائیت می‌رود. اگر یک مذاب تشکیل دهنده پگماتیت قادر به تبلور البائیت باشد به احتمال زیاد از دیگر عناصر کمیاب، همانند روبیدیم، سزیم یا تانتالیم غنی است (London, 1999).

حضور تورمالین صورتی، سبز و یا آبی غنی از لیتیم نشان می‌دهد که پگماتیت دارای پتانسیل اقتصادی است اگر چه همه پگماتیت‌های دارای کانه‌زایی تانتالیم این گونه نیستند. بالا رفتن مقادیر کلسیم یا منیزیم در تورمالین در پگماتیت‌ها به‌احتمال زیاد نشان‌دهنده آلودگی مذاب‌های گرانیتی توسط یک سنگ میزبان غنی از کلسیم و منیزیم (معمولاً سنگ‌های مافیک متاولکانیک) است.

به باور London et al. (1996) و London (1999) آلودگی توده‌های گرانیتی و خارجی‌ترین زون‌های پگماتیتی با منیزیم از طریق سنگ میزبان این توده‌ها

به‌طور کلی نشانه خوبی برای اقتصادی بودن پگماتیت‌ها نیست، اگر چه ممکن است مناطق درونی‌تر توده پگماتیتی اقتصادی باشند. برای مثال، تورمالین در زون‌های مرزی پگماتیت‌های Tanco در مونیتوبا-کانادا، شورل سیاه رنگ غنی از کلسیم و منیزیم است ولی در زون‌های تفریق یافته‌تر البائیت صورتی رنگ است (Selway et al., 2000) در پگماتیت‌های منطقه تنها برخی از رخساره‌ها دارای تورمالین هستند که عبارتند از:

- رخساره کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین
- رخساره کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین + گارنت
- رخساره کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین + بیوتیت
- رخساره کوارتز + تورمالین ± مسکوویت

مابقی رخساره‌های درون پگماتیت‌های منطقه فاقد تورمالین هستند. تورمالین‌های همه رخساره‌هایی که دارای تورمالین هستند با توجه به نتایج تجزیه XRD، همه سیاه رنگ (از سری دراویت-شورل و البائیت-شورل) است و به‌صورت میله‌ای و شعاعی دیده می‌شوند که فراوانی آنها در مناطق مختلف متفاوت است. برای مثال در رخساره کوارتز + تورمالین ± مسکوویت مقدار این تورمالین به قدری زیاد است که تورمالین به‌رنگ سیاه به‌همراه کوارتز با اندازه‌های درشت به‌صورت یک کانی مجزا در سنگ دیده می‌شود.

با توجه به نتایج تجزیه XRD تورمالین‌های رخساره "کوارتز+ فلدسپار پتاسیک+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ بیوتیت+ تورمالین" از نوع یوویت (Uvite) است که حاصل دگرسانی پنوماتولیتی پلاژیوکلاز و بیوتیت به تورمالین نوع کلسیم و منیزیم‌دار (یوویت) با ترکیب شیمیایی ($CaMg_3(Al_5Mg)Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH)_4$) است که به‌رنگ سیاه تا سبز یا قهوه‌ای مایل به‌سیاه دیده می‌شود.

تورمالین‌های رخساره «کوارتز+ فلدسپار پتاسیک+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ تورمالین+ گارنت» با توجه به تجزیه XRD از دو نوع البائیت (Elbaite) با فرمول شیمیایی ($Na(Li_{1.5},Al_{1.5})Al_6Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH)_4$) به‌رنگ سبز تیره مایل سیاه و دراویت (Dravite) با فرمول شیمیایی ($NaMg_3Al_6Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH)_4$) و با رنگ قهوه‌ای تیره مایل سیاه است.

طبق تجزیه XRD تورمالین‌های رخساره‌های "کوارتز+ فلدسپار پتاسیک+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ تورمالین" و "کوارتز+ تورمالین ± مسکوویت» از نوع شورل است.

بر پایه نتایج تجزیه ژئوشیمیایی منطبق بر نمودار $Al - Al_{50}Fe_{50} - Al_{50}Mg_{50}$ که توسط Henry & Guidotti (1985) ارائه شده ترکیب کلی نمونه‌های تورمالینی درون هر یک از رخساره پگماتیتی از نوع شورل، البائیت و تا حدودی دراویت مشخص شده است (شکل۶).

۸-گارنت

حضور کانی گارنت در یک گرانیت نشان می‌دهد که گرانیت پرآلومین و بارور است، در حالی که گرانیت عقیم از کانه‌زایی، فاقد گارنت است. گارنت به‌دلیل تغییر رنگ و ترکیب آن همراه با افزایش تفریق جزء به‌جزء مذاب گرانیتی یک ابزار اکتشافی عالی است (Černý,1989a). گرانیت‌های بارور دارای گارنت قرمز غنی از آهن (آلماندین) و پگماتیت‌های نوع عناصر کمیاب دارای گارنت نارنجی غنی از منگنز (اسپسارتین) هستند. آلماندین سرخ معمول‌ترین گونه از گارنت در گرانیت‌های بارور و پگماتیت‌هاست. با کاهش نسبت Fe/Mn، مقادیر آهن کاهش و مقادیر منگنز در گارنت‌ها در طی افزایش تفریق، در مذاب پگماتیتی افزایش می‌یابد (Černý,1989a; Whitworth,1992).

گارنت اسپسارتین مشخصه‌ای از زون جایگزینی و زون هسته‌ای غنی از کوارتز در پگماتیت‌های دارای کانی‌های لیتیم‌دار مانند اسپودومن، لپیدولیت، پتالیت و آمبلیگونیت است (Baldwin & von Knorring, 1983). گارنت‌های درون رخساره‌های پگماتیتی منطقه جنوب مشهد از دو نوع سرخ و قهوه‌ای هستند که اندازه آنها در مناطق مختلف متفاوت است و قطر آنها از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر می‌رسد که فراوانی گارنت‌های با قطر چند میلی‌متر بیشتر است. گارنت‌های سرخ رنگ که به‌طور عمده ریزدانه هستند، بسیار شفاف و غیردگرسان هستند ولی گارنت‌های قهوه‌ای نیمه شفاف تا مات و مقداری نیز دگرسان شده و شکننده هستند. قطر این دانه‌های گارنت به حد چند سانتی‌متر می‌رسد و درشت‌تر از گارنت‌های سرخ هستند.

با توجه به مطالعه نقطه‌ای با روش SEM، گارنت‌های منطقه از نوع آهن-منگنزدار (آلماندین – اسپسارتین) هستند که هیچ‌گونه زون‌بندی در آن دیده نمی‌شود (شکل۷) که این مطالب با نمودارهای Fe – Mn – (Ca×10)، Mg در برابر $Mn/(Mn+Fe^{2+})$ و Ca در برابر $Mn/(Mn+Fe^{2+})$ تأیید می‌شود. در نمودارهای Mg در برابر $Mn/(Mn+Fe^{2+})$ و Ca در برابر $Mn/(Mn+Fe^{2+})$ همه گارنت‌های منطقه در محدوده آلماندن – اسپسارتین (آهن- منگنز)دار قرار گرفته‌اند و همان‌گونه که مشخص است میزان منیزیم و کلسیم این گارنت‌ها بسیار پایین و در حد صفر است، بدین ترتیب این گارنت‌ها و در نتیجه پگماتیت‌ها، تفریق یافتگی به نسبت متوسطی داشته و با سنگ‌های مافیک پیرامون آلودگی نشان نمی‌دهند (شکل ۸).

۹-آپاتیت

حضور فلوئورآپاتیت ($Ca_5(PO_4)_3(F)$) آبی یا سبز در گرانیت، پگماتیت یا آپلیت نشان می‌دهد که تبلور از مذابی غنی از فلوئور- فسفر صورت گرفته است. اگر چنین مذابی تفریق حاصل نماید ممکن است مقادیر منگنز در فلوئورآپاتیت بالا رود (برای مثال، بیش از ۲٪ وزنی MnO) و در پگماتیت نوع عنصر کمیاب تمرکز یابد (Černý, 1989a).

برخی از پگماتیت‌ها فلوئورآپاتیت‌های فقیر از منگنز تولید می‌کنند که دلیل آن، عدم جدایش ترجیحی و تمایل منگنز به گارنت یا کانی‌های اکسیدی بیش از فلوئورآپاتیت در طی تبلور است. برای مثال پگماتیت نوع اسپودومن McCombe، اونتاریو-کانادا دارای فلوئورآپاتیت با بیش از ۰/۸ درصد وزنی MnO همراه با گارنت غنی از منگنز و کانی‌های اکسیدی (اسپسارتین و منگنوتیتانیت) در آن است (Černý, 1989a).

حضور فلوئورآپاتیت سبز یا آبی همراه با سنگ غنی از منگنز نشان می‌دهد که پگماتیت دارای پتانسیل اقتصادی است، اگرچه همه پگماتیت‌های دارای کانه‌زایی دارای فلوئورآپاتیت غنی از منگنز نیستند (Černý, 1989a).

در همه رخساره‌های پگماتیتی منطقه مورد مطالعه به‌جز رخساره «کوارتز + تورمالین ± مسکوویت»، کانی آپاتیت به‌صورت منشوری و چند ضلعی وجود دارد که این کانی‌های آپاتیتی به‌صورت خود شکل یا نیمه خود شکل در سنگ‌های پگماتیتی دیده می‌شوند. فراوانی این آپاتیت‌ها در مقاطع نازک، کم است و به‌صورت یک کانی فرعی در سنگ دیده می‌شوند. با توجه به مطالعات تجزیه نقطه‌ای با روش SEM این آپاتیت‌ها به‌طور عمده از نوع هیدروکسی آپاتیت و به مقدار کمتر فلوئورآپاتیت هستند (شکل۹).

۱۰-ژئوشیمی توده‌های پگماتیتی

همان‌گونه که بیان شد گرانیت‌های میزبان پگماتیت‌های منطقه، کالک آلکالن و از نوع S است و میزان آلومین در آنها بالاست. همچنین پگماتیت‌های جنوب مشهد (هر ۷ رخساره) با توجه به تجزیه شیمیایی ۱۰۰ نمونه، پرآلومین است و نسبت آلومینیم به عناصر آلکالی در آنها بیشتر از یک است (A/CNK=1.3-1.6) (جدول۳).

این پگماتیت‌ها در رده‌بندی Černý (1995) در رده پگماتیت‌های نوع LCT (لیتیم – سزیم – تانتالیم) قرار می‌گیرند.

طبق نمودار ANK در برابر ANCK که توسط Maniar & Piccolli (1989) ارائه شده پگماتیت‌های منطقه به‌شدت پرآلومین هستند (شکل ۱۰).

نسبت Mg/Li حاصل از تجزیه توده‌ای سنگی (Bulk) یکی از بهترین شاخص‌های تعیین درجه تفریق پگماتیت و گرانیت‌هاست. افزایش تفریق در تبلور کانی‌های دارای Be, B, Li, Ta و Cs مؤثر است. بالا رفتن نسبت Mg/Li (برای مثال Mg/Li>50) نشان‌دهنده فراوانی منیزیم در سنگ اولیه است، در حالی که نسبت پایین Mg/Li (برای مثال Mg/Li<10) نشان‌دهنده بالا رفتن مقدار لیتیم در سنگ تفریق یافته است. سنگ‌های غنی از لیتیم دارای پتانسیل اقتصادی بیشتری از سنگ‌های فقیر از لیتیم هستند (Černý, 1989a).

میانگین نسبت Mg/Li در پگماتیت‌های منطقه از ۰/۸ تا ۱۰/۹ متغیر است که این مقدار در رخساره پگماتیتی "کوارتز+ فلدسپار پتاسیک+ پلاژیوکلاز + مسکوویت+ لپیدولیت+ تورمالین" به‌طور میانگین برابر ۰/۸، (کمترین مقدار) و در رخسار "کوارتز+ تورمالین ± مسکوویت" برابر ۱۰/۹، (بیشترین مقدار) است (جدول۴).

طبق نمودار Mg/Li در برابر Li، بیشتر رخساره‌های پگماتیتی در محدوده Mg/Li برابر ۰/۲ تا ۱۰ قرار می‌گیرند و هر چه از مقدار نسبت Mg/Li کمتر می‌شود بر مقدار لیتیم نیز افزوده می شود (شکل۱۱).

در نمودار Rb/Sr در برابر Li با افزایش تفریق پگماتیت‌ها بر مقدار لیتیم آنها نیز افزوده شده و این روند یک روند افزایشی است (شکل۱۲).

۱۱–بحث و نتیجه‌گیری

همان‌گونه که بیان شد پگماتیت‌های جنوب مشهد از نوع پرآلومین است و با توجه به مطالعات سیال‌های درگیر درون کوارتزهای این سنگ‌ها، ژرفای تشکیل این پگماتیت‌ها در فشار حدوداً ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ بار و درجه حرارت ۲۸۵ تا ۳۵۰ سانتی‌گراد است. با توجه به حضور کانی لپیدولیت و کانی‌های تورمالین از نوع شورل و البائیت و گارنت‌های آلماندن و اسپسارتین، این پگماتیت‌ها غنی از لیتیم و منگنز هستند. این پگماتیت‌ها از نظر فراوانی عنصر فسفر (حضور کانی آپاتیت) و F (حضور کانی فلوئورآپاتیت) در حد متوسط است (شکل۱۳). بنابراین با توجه به مطالب بیان‌شده پگماتیت‌های جنوب مشهد از نوع پگماتیت‌های نوع LCT و مربوط به زیر شاخه پگماتیت‌های نوع مسکوویت – عناصر کمیاب لیتیم‌دار (Muscovite – Rare – element – Lithium یا (MSREL-Li)) هستند (Černý & Ercit, 2005).

زیر گروه پگماتیت‌های لپیدولیت دار به‌نسبت گسترده هستند و توسط لپیدولیت به‌عنوان آلومینوسیلیکات لیتیم‌دار غیر غالب (یا منحصر بفرد) مشخص شده‌اند. لپیدولیت به‌وسیله فشار بالای KF و LiF در اسیدیته به‌نسبت کم تثبیت شده است. افزایش فشار HF سبب تثبیت لپیدولیت + توپاز می‌شود (London, 1982). با این حال شوری فلوریدی بالا + افزایش فشار HF در زیرگروه لپیدولیت سبب تفریق شدید در Fe-Mn می‌شود (Černý & Ercit, 1985; Černý,1989a).

تفریق منگنز از آهن و غنی‌شدگی آن در مراحل پایانی تکامل پگماتیت به‌ویژه در پگماتیت‌های غنی از F مشخص است. به‌طور ویژه، گارنت غنی از Mn، کانی‌های فسفاتی و اکسیدهای Nb,Ta از ویژگی‌های زیر گروه لپیدولیت‌دار فعالیت بالا از آلکالی‌های فلوئوریدی هستند (Černý & Ercit, 1985, Černý et al., 1986; Černý, 1989a). با این حال در برخی موارد غنی‌شدگی در منگنز یکی از ویژگی‌های اصلی پگماتیت‌ها در نظر گرفته می‌شود که از یک والد غنی از Mn به ارث برده شده و یا از یک سنگ غنی از Mn هضم شده است (Harada et al., 1976).

گرانیت‌های جنوب مشهد از نوع پرآلومین (A/CNK=1.3-1.6) و از نوع S هستند. پگماتیت‌های درون گرانیت‌های جنوب مشهد از نوع همگن و فاقد منطقه‌بندی هستند که از نظر کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری دارای ۷ رخساره زیر هستند:

۱– کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتوکلاز + میکروکلین)+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ بیوتیت

۲– کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتوکلاز + میکروکلین)+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ بیوتیت+ تورمالین

۳–کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتوکلاز + میکروکلین)+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ تورمالین

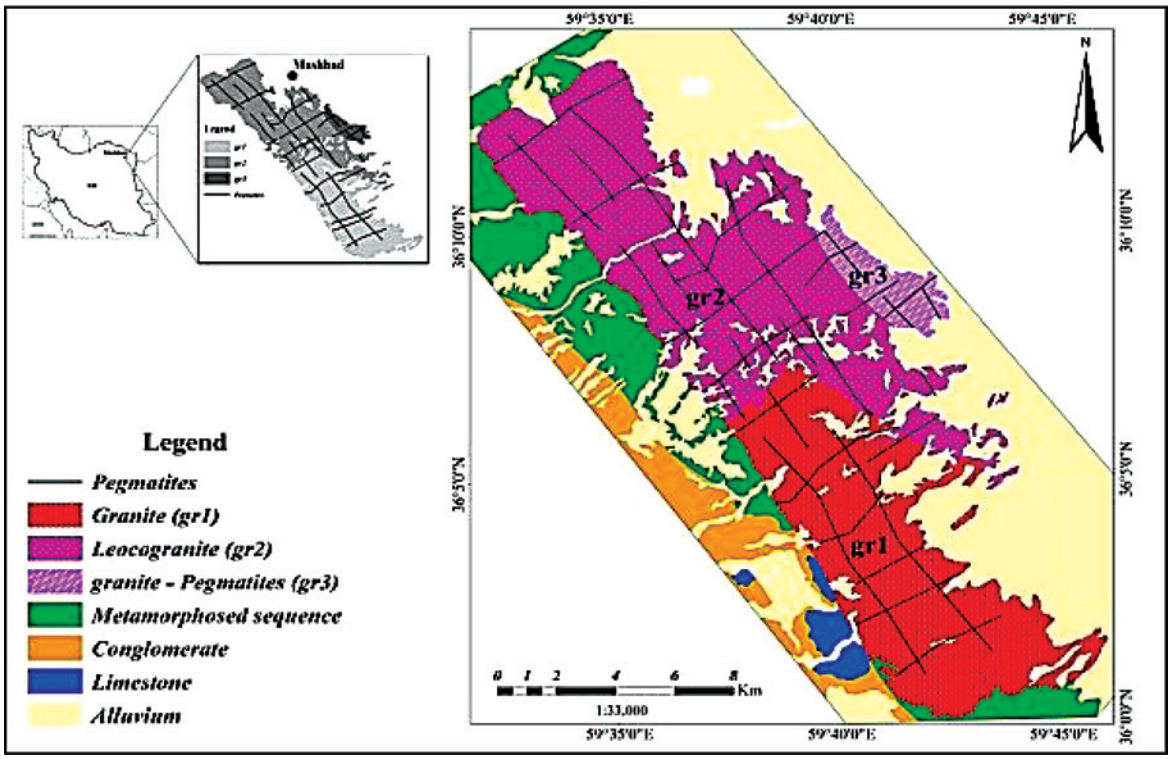
۴–کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتوکلاز + میکروکلین)+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+تورمالین+ گارنت

۵–کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتوکلاز + میکروکلین)+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ لپیدولیت+ گارنت

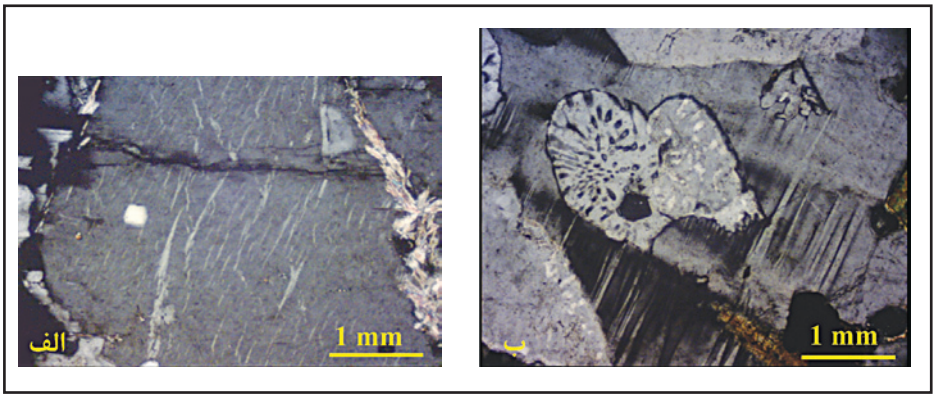
۶–کوارتز + تورمالین ± مسکوویت

۷–کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتوکلاز + میکروکلین)+ پلاژیوکلاز+ مسکوویت+ بریل

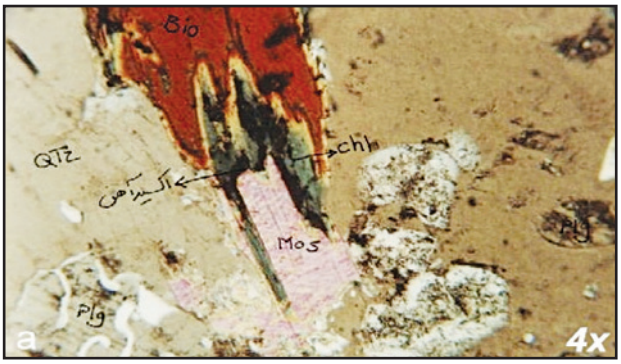
میکاهای این پگماتیت‌ها با توجه به نتایج تجزیه‌های XRD و تجزیه‌های ICP از نوع مسکوویت و لپیدولیت بوده و گارنت‌های درون این پگماتیت‌ها (رخساره‌هایی که دارای گارنت هستند) از نوع آلماندن – اسپسارتین هستند. با توجه به تجزیه‌های شیمی و بررسی‌های ژئوشیمیایی، این پگماتیت‌ها در برخی مناطق دارای غنی‌شدگی لیتیم در حد اقتصادی هستند. نسبت Mg/Li برای تجزیه توده سنگی (Bulk) که یکی از بهترین شاخص‌های تعیین درجه تفریق پگماتیت و گرانیت‌هاست، در بیشتر این رخساره‌های پگماتیتی در محدوده میان ۰/۲ تا ۱۰ است که با کاهش این نسبت بر میزان فراوانی لیتیم افزوده می‌شود. مقادیر لیتیم در بخش‌هایی از رخساره‌های پگماتیتی بالاتر از ppm ۱۰۰۰ بوده و در حد اقتصادی است. با توجه به این مطلب که مقادیر لیتیم با افزایش ژرفا افزایش می‌یابد (Galeschuk & Vanstone, 2007). بنابراین پیشنهاد می‌شود برای تعیین دقیق میزان عیار لیتیم در انواع رخساره‌های پگماتیتی منطقه، به‌حفر گمانه و نمونه‌برداری های ژرفی اقدام شود.



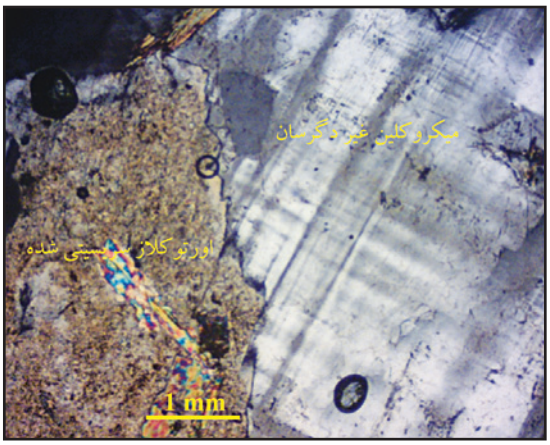
شکل۱- موقعیت گرانیت‌ها و پگماتیت‌های جنوب مشهد (برگرفته از طاهری و قائمی،۱۳۷۳).



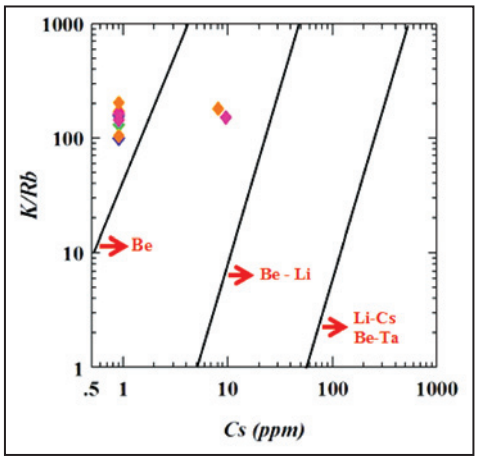
شکل۲- الف) بافت پرتیت در ارتوکلاز؛ ب)بافت میرمکیتی در ارتوکلاز در کنار میکروکلین.



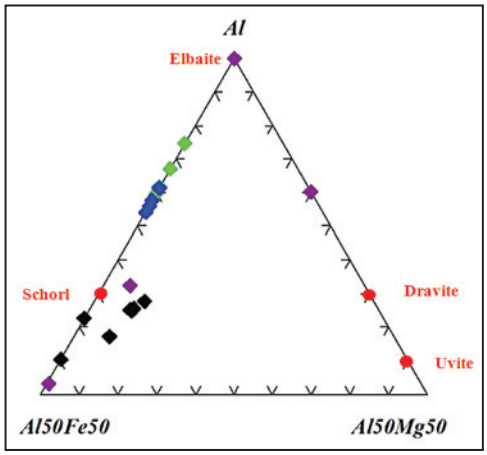
شکل۳- تجزیه گرمابی بیوتیت به کلریت و مسکوویت Mus= مسکوویت، Bio= بیوتیت و Chl= کلریت.



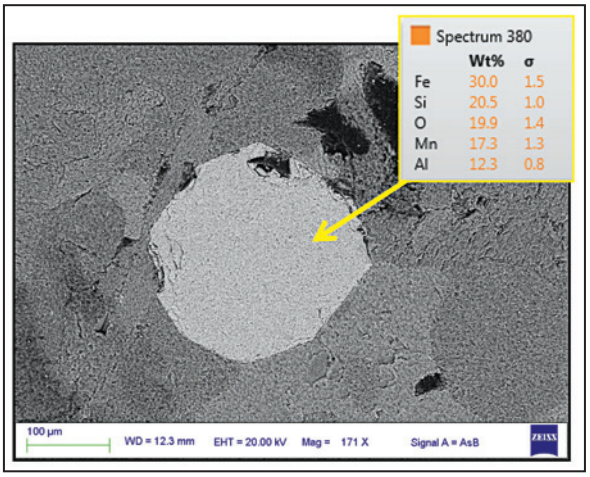
شکل۴- دو نسل فلدسپار در پگماتیت‌های منطقه، میکروکلین‌های غیردگرسان و ارتوکلازهای دگرسان شده.



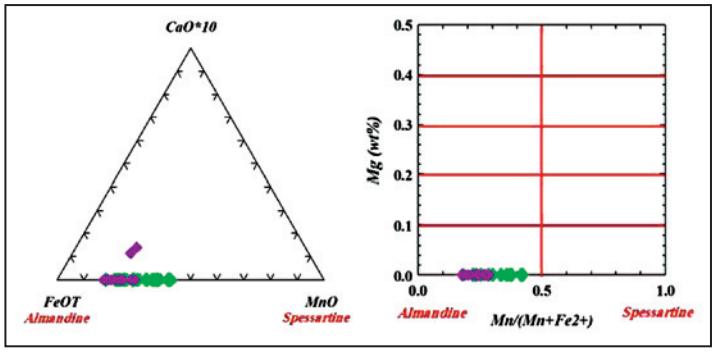
شکل۵- نمودار K/Rb-Cs برای فلدسپارهای درون پگماتیت‌های منطقه، برای تعیین پتانسیل اقتصادی پگماتیت‌ها (محدوده‌های کانه‌زایی عناصر Be، Be-Li و Li-Cs-Ba-Ta ارائه شده توسط Černý, 1989b).



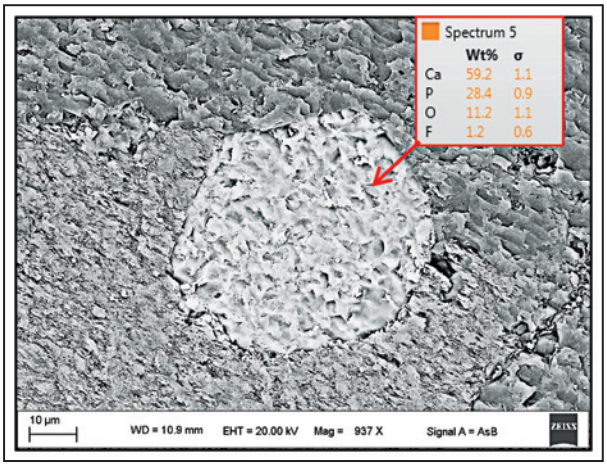
شکل۶- نمودار $Al - Al_{50}Fe_{50} - Al_{50}Mg_{50}$ برای مشخص کردن ترکیب تورمالین‌های درون انواع رخساره‌های پگماتیتی منطقه جنوب مشهد (Henry & Guidotti, 1985).



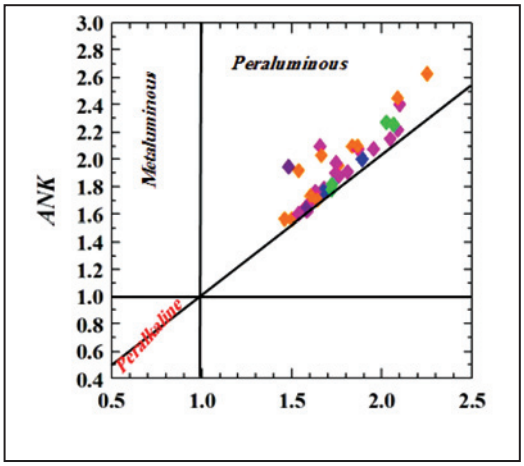
شکل۷- نتایج تجزیه نقطه‌ای نمونه گارنت‌های درون پگماتیت‌های منطقه با روش SEM، همان‌گونه که دیده می‌شود گارنت‌های منطقه از نوع آهن- منگنزدار (آلماندن- اسپسارتین) هستند.



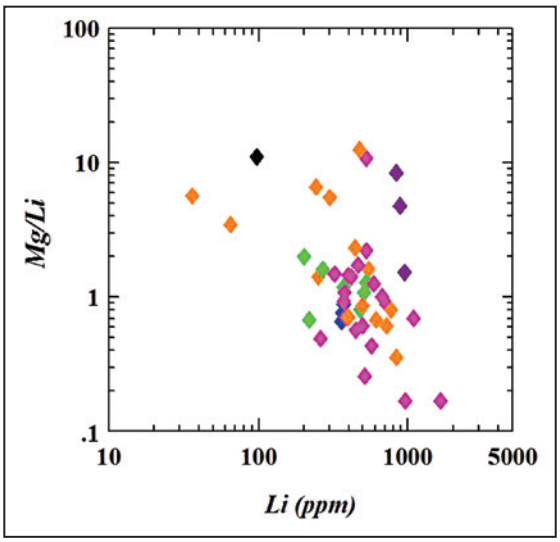
شکل۸- الف) نمودار MnO-FeO-(CaO×10) (Muller et al., 2009)؛ ب) نمودار Mg در برابر $Mn/(Mn+Fe^{2+})$ برای تعیین نوع گارنت‌های درون پگماتیت‌های منطقه جنوب مشهد.



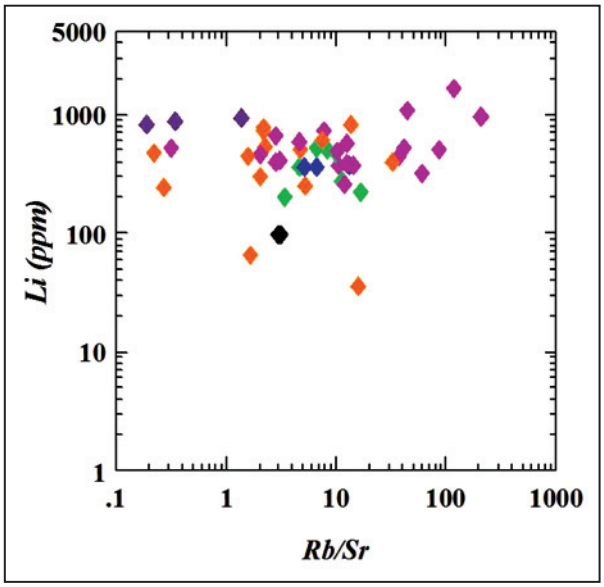
شکل۹- نتایج تجزیه نقطه‌ای نمونه آپاتیت‌های درون پگماتیت‌های منطقه با روش SEM، همان‌گونه که دیده می‌شود آپاتیت‌های منطقه از نوع فلوئوردار (فلوئورآپاتیت) هستند. (البته شایان ذکر است که آپاتیت‌های هیدروکسیل‌دار دارای فراوانی بیشتری نسبت به آپاتیت‌های فلوئوردار در این سنگ‌ها هستند).



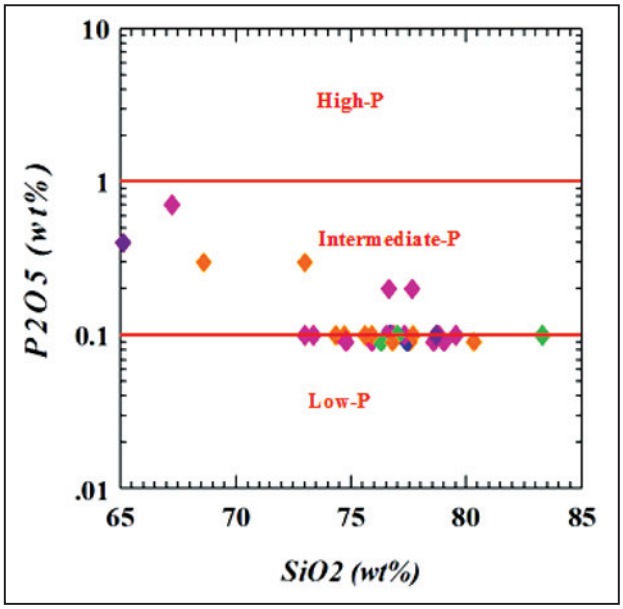
شکل۱۰- نمودار ANK-ACNK برای سنگ‌های پگماتیتی منطقه جنوب مشهد، باتوجه به این نمودار نمونه‌های پگماتیتی منطقه از نوع به شدت پرآلومین هستند (Maniar & Piccolli, 1989).



شکل ۱۱- نمودار Mg/Li – Li برای تعیین پتانسیل اقتصادی انواع رخساره‌های پگماتیتی منطقه جنوب مشهد. با توجه به این نمودار، عمده رخساره‌های پگماتیتی در محدوده Mg/Li برابر ۰/۲ تا ۱۰ قرار گرفته‌اند و هر چه از مقدار نسبت Mg/Li کمتر می‌شود بر مقدار لیتیم نیز افزوده می‌شود (Černý, 1989b).



شکل۱۲- نمودار تغییرات Rb/Sr – Li برای انواع رخساره‌های پگماتیتی منطقه جنوب مشهد. با افزایش مقادیر Rb/Sr (افزایش درجه تفریق)، مقدار Li افزایش می‌یابد (Černý & Meintzer, 1988).



شکل۱۳- نمودار تغییرات P_2O_5 در برابر SiO_2 برای انواع رخساره‌های پگماتیتی منطقه جنوب مشهد (Kuster, 2009).

جدول۱- مقایسه میانگین عناصر K, Rb, Cs, Sr و نسبت‌های آنها در ترکیب فلدسپارهای انواع رخساره‌های پگماتیتی منطقه جنوب مشهد (بر پایه نتایج تجزیه ICP).

انواع رخساره های پگماتیتی	نشانه	K (ppm)	Rb (ppm)	Cs (ppm)	Sr (ppm)	K/Rb	K/Cs	Rb/Cs	Rb/Sr
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio	◆	۷۸۳۰۷	۶۴۴/۵	۰/۹	۳۹/۶	۱۲۶	۸۷۰۰۸	۷۱۶	۴۱
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio+Tour	◆	۵۰۲۱۸	۳۷۵/۵	۰/۹	۳۹/۸	۱۳۴	۵۵۷۹۸	۴۱۷	۹
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour	◆	۱۰۰۹۳۶	۷۹۰/۲	۰/۹	۷۷/۴	۱۲۹	۱۱۲۱۵۱	۸۷۸	۱۸
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour+Gar	◆	۹۹۲۶۰	۷۴۸/۶	۰/۹	۵۳	۱۳۳	۱۱۰۲۸۹	۸۳۲	۱۴
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Gar	◆	۸۵۲۶۲	۵۶۲/۶	۱/۰۱	۸۶/۳	۱۵۲	۹۲۸۲۴	۵۹۴	۱۵
Qtz+Tour±Mus	◆	–	–	–	–	–	–	–	–

جدول۲- مقایسه میانگین عناصر K, Rb, Cs, Li, Ta و نسبت‌های آنها در ترکیب میکاهای انواع رخساره‌های پگماتیتی منطقه جنوب مشهد (بر پایه نتایج تجزیه ICP).

انواع رخساره های پگماتیتی	نشانه	K (ppm)	Rb (ppm)	Cs (ppm)	Li (ppm)	Ta (ppm)	K/Rb	K/Cs	Rb/Cs
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio	♦	۷۷۵۹۵	۷۶۲	۵	۵۷۴۵	۲۲/۳	۱۰۳	۱۵۳۴۱	۱۵۳
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio+Tour	♦	–	–	–	–	–	–	–	–
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour	♦	۵۷۳۲۸	۱۴۳۰	۳/۹	۲۱۴۵	۴۷/۸	۴۰	۱۴۸۱۰	۳۶۹
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour+Gar	♦	–	–	–	–	–	–	–	–
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Gar	♦	۶۸۲۷۶	۸۷۶	۴/۴	۳۹۷۵	۱۷/۷	۸۷	۱۶۱۱۵	۱۹۱
Qtz+Tour±Mus	♦	–	–	–	–	–	–	–	–

جدول۳- مقایسه میانگین عناصر K, Na, Ca, Al و نسبت‌های A/CNK و Na_2O/K_2O در ترکیب انواع رخساره‌های پگماتیتی منطقه جنوب مشهد (بر پایه نتایج تجزیه ICP).

انواع رخساره های پگماتیتی	نشانه	(%) Al_2O_3	CaO (%)	(%) K_2O	(%) Na_2O	A/CNK	Na_2O/K_2O
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio	♦	۱۳/۹	۱/۰	۵/۴	۵/۰	۱/۶	۱/۳
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio+Tour	♦	۱۴/۷	۲/۴	۶/۲	۴/۷	۱/۶	۱/۰
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour	♦	۱۵/۲	۰/۴	۴/۷	۴/۳	۱/۶	۰/۹
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour+Gar	♦	۱۳/۹	۰/۵	۵/۳	۴/۳	۱/۴	۰/۹
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Gar	♦	۱۳/۴	۰/۷	۵/۱	۴/۷	۱/۳	۱/۱
Qtz+Tour±Mus	♦	۱/۶	۰/۰۲	۰/۱	۰/۲	۱/۴	۰/۶

جدول۴- مقایسه میانگین عناصر Mg, Li, Sr, Rb و نسبت‌های آنها در ترکیب انواع رخساره‌های پگماتیتی منطقه جنوب مشهد (بر پایه نتایج تجزیه ICP).

انواع رخساره های پگماتیتی	نشانه	Mg (ppm)	Li (ppm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Mg/Li	Rb/Sr
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio	♦	۱۰۲۵	۴۴۱/۵	۲۵۷	۱۶۶	۲/۳	۴/۲
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio+Tour	♦	۴۱۸۶	۸۸۶	۱۹۷	۵۷۱	۴/۷	۳/۴
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour	♦	۲۸۱	۳۶۳/۵	۳۴۱	۵۱	۰/۸	۹/۲
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour+Gar	♦	۴۳۳	۳۶۷	۲۷۶	۲۹	۱/۲	۹/۴
Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Gar	♦	۷۳۲	۵۸۶/۵	۳۰۸	۶۷	۱/۲	۲۷/۲
Qtz+Tour±Mus	♦	۱۰۵۶	۹۶/۵	۱۲	۴	۱۰/۹	۴/۷

کتابنگاری

دیدار، پ.، ۱۳۸۲- بررسی پترولوژیکی گرانیتوییدهای جنوب مشهد با نگرشی بر ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب، پایان‌نامه کارشناسی ارشد پترولوژی، پژوهشکده علوم زمین.

طاهری، ج. و قائمی، ف.، ۱۳۷۳- نقشه زمین‌شناسی مشهد با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

کریم‌پور، م. ح.، فارمر، ل. و استرن، چ.، ۱۳۹۰- ژئوشیمی رادیوایزوتوپ‌ها Rb–Sr و Sm–Nd، سن‌سنجی زیرکن U-Pb و تعیین منشأ لیکوگرانیت‌های خواجه‌مراد، مشهد، ایران. مجله علوم‌زمین، شماره ۸۰: ۱۷۱-۱۸۲.

میرنژاد، ح.، ۱۳۷۰- پترولوژی گرانیت‌ها و پگماتیت‌های جنوب مشهد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۲۵۹ صفحه.

ولی‌زاده، م. و. و کریم‌پور، م. ح.، ۱۳۷۴- منشأ و موقعیت تکتونیکی گرانیت‌های جنوب مشهد، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۲۱، شماره ۱: ۷۱-۸۲.

References

Baldwin, J. R. & Von Knorring, O., 1983- Compositional range of Mn-garnet in zoned granitic pegmatites. Can. Min., 21, 683-688.

Černy, P. & Ercit, T. S., 1985- Some recent advances in the mineralogy and geochemistry of Nb and Ta in rare-element granitic pegmatites. Bull. Minéral. 108, 499-532.

Černy, P. & Ercit, T. S., 2005- THE CLASSIFICATION OF GRANITIC PEGMATITES REVISITED, The Canadian Mineralogist, Vol. 43, P. 2005-2026.

Černý, P. & Meintzer, R. E., 1988- Fertile granites in the Archaean and Proterozoic fields of rare-element pegmatites: crustal environment, geochemistry and petrogenetic relationships, In: Taylor RP, Strong DF (eds) Recent Advances in the Geology of Granite-Related Mineral Deposits. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Special Volume 39: 170–207.

Černy, P., 1989b- Exploration strategy and methods for pegmatite deposits of tantalum. In Lanthanides, Tantalum and Niobium (P. Möller, P. Černý & F. Saupé, eds.). Springer- Verlag, Berlin, Germany (271-299).

Černý, P., 1989a- Mineralogy of Rubidium and Cesium. In: Cerny, P. (ed.) Anatomy and classification of granitic pegmatite in Science and Industry. Mineralogical Assoc. Of Canada. Short Course Handbook, Vol.8, pp. 1-39.

Černý, P., Goad, B. E., Hawthorne, F. C. & Chapman, R., 1986- Fractionation trends of the Nb- and Ta-bearing oxide minerals in the Greer Lake pegmatitic granite and its pegmatite aureole, southeastern Manitoba. Am. Mineral. 71,105-517.

Černý, P., Trueman, D. L., Ziehlke, D.V., Goad, B. E. & Paul, B. J., 1981- The Cat Lake – Winnipeg River and the Wekusko Lake pegmatite fi elds, Manitoba. Manitoba Energy & Mines, Econ. Geol. Rep. ER80–1.

Černý; P., 1995- Rare element granitic pegmatites - state of art and future prospects - Colloque International Mineralogie Fondamentale et appliquée à la memoire de Claude - Guillemin. Documents B. R. G. M.,243, pages 15 to 19.

Galeschuk, C. &Vanstone, P., 2007- Exploration Techniques for Rare-Element Pegmatite in the Bird River Greenstone Belt, Southeastern Manitoba, In «Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration» edited by B. Milkereit, 2007, p. 823-839.

Gordiyenko, V. V., 1971- Concentration of Li, Rb and Cs in potash feldspar and muscovite as criteria for assessing the rare metal mineralization in granitic pegmatites; International Geological Review, v.13, p. 134-142.

Guilbert, J. M. & Park, C. F., 1997- The Geology of Ore Deposits. New York, Freeman.

Harada, K., Honda, M., Nagashima, K. & Kanisawa, S., 1976- Masutomilite, manganese analogue of zinnwaldite, with special reference to masutomilite-lepidolite-zinnwaldite series. Mineral. J. Japan 8, 95-109.

Henry, D. J. & Guidotti, C. V., 1985- Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: An example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine: American Mineralogist, v. 70, p. 1-15.

Karimpour, M. H., Farmer, G. L. & Stern, C. R., 2009- Geochronology, Radiogenic Isotope Geochemistry, and Petrogenesis of Sangbast Paleo-Tethys Monzogranite, Mashhad, Iran, Iranian Society Crystallography and Mineralogy, Vol.17, No.4,winter 2009.

Kuster, D., 2009- Granitoid-hosted Ta mineralization in the Arabian–Nubian Shield: Ore deposit types, tectono-metallogenetic setting and petrogenetic framework. Ore Geology Reviews.35, pp. 68-86.

London, D., 1982- Stability of spodumene in acidic and saline fluorine-rich environments. Carnegie Institution of Washington Year Book, 81, 331-334.

London, D., 1999- Stability of tourmaline in peraluminous granite systems: the boron cycle from anatexis to hydrothermal aureoles. Invited keynote lecture for special issue on tourmaline, proceedings of Tourmaline 1997 (Czech Republic). European Journal of Mineralogy, 11, 253-262.

London, D., Morgan, G. B. V. & Wolf, M. B., 1996- Boron in granitic rocks and their contact aureoles. Invited chapter for Boron: Mineralogy, Petrology, and Geochemistry of Boron in the Earth›s Crust (E.S. Grew and L. Anovitz, eds.), Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy, 33, 299-330.

Majidi, B., 1978- Etude petrostructural de la region de Mashhad (Iran), Les problems de metamorphites, serpentinites et granitoides Hercynians: these Universite Scientifique et Medicale de Grenoble, France, 277p.

Maniar, P. D. & Piccoli, P. M., 1989- Tectonic discrimination of granitoids: Geol.Soc.Of Am.Bull.,V.101,P.635-643.

Mirnejad, H., 1991- Geochemistry and petrography of Mashhad granites and pegmatites, M.Sc. thesis, Tehran University.

Morteani, G. & Gaupp, R., 1989- Geochemical evaluation of the tantalum potential of pegmatites; in Lanthanides, tantalum and niobium, Springer-Verlag, New York, p.303-310.

Muller, A., Ihlen, P. M., Larsen, R. B., Spratt, J. & Seltmann, R., 2009- Quartz and Garnet Chemistry of South Norwegian Pegmatite and its implications for Pegmatite Genesis, Estudos Geologicos, Vol. 19, P. 20-24.

Selway, J. B., Novák, M., Černý, P. & Hawthorne, F. C., 2000- The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba. XIII. Exocontact tourmaline. Canadian Mineralogist, 38, 869-976.

Whitworth, M. P., 1992- Petrogenetic implications of garnets associated with lithium pegmatites from SE Ireland; Mineralogical Magazine, v.56, p.75-83.

Geology and Mineralogy of the Pegmatites of South Mashhad (NE Iran); With Especial Emphasis on the Lithium Mineralization Therein

P. Didar [1*], N. Nezafati [2], M. H. Emami [3], A. Solgi [2]

[1] Ph.D., Department of Geology, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

[2] Assistant Professor, Department of Geology, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

[3] Associate Professor, Department of Geology, Islamic Azad University, Eslamshahr Branch, Tehran, Iran

Received: 2013 April 06 Accepted: 2013 July 20

Abstract

by several pegmatite veins. These granitic bodies are of orogenic (collisional), peraluminous, S- type and host the pegmatites in an area of 40km^2. This paper presents the geological, geochemical, and mineralogical investigations on the pegmatite veins in order mainly to examine their economic value for lithium and lithium bearing minerals. For this purpose, the pegmatite veins of the area were first mapped and sampled. In this regard, more than 100 samples from the pegmatites and associated granites were taken and investigated using polarized microscopy, SEM, XRD, and ICP. According to the field observations and laboratory examinations, seven individual pegmatite facies were recognized, all of which of LCT (Li, Cs, Ta) type (based on Cerny-2005-classification). The studied pegmatites contain three main types of mica including muscovite, lepidolite, and biotite and host from 430 to 1150 ppm lithium. Beside lithium bearing mica, presence of some other minerals such as garnet (almandine-spessartite), tourmaline (schorl-dravite series and schorl-elbaite series), and apatite are of interest, especially because of their potential for hosting REEs. The average of A/CNK index for the pegmatites is 1.3 to 1.6, while the average of Mg/Li is 3.9 to 24.1. The average of lithium for the facies of "quartz + tourmaline ± muscovite" is 19.3ppm, while the average of Li for the facies of "quartz+ potassium feldspar + plagioclase + muscovite + lepidolite + biotite + tourmaline" is 177.2 ppm. The low Mg/Li ratio, the high content of lithium, and the mineralization of lepidolite introduce the pegmatites of Mashhad as a significant potential for lithium, what that is being introduced for the first time from these pegmatites.

Keywords: Pegmatites, Lithium, Lepidolite, Granite, South of Mashhad.

For Persian Version see pages 209 to 218

*Corresponding author: P. Didar; E-mail: pezhwakdidar@gmail.com

Created with nitroPDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional