



## ویژگی‌های ژئوشیمیایی و سنگ‌زایی سنگ‌های مافیک - فرامافیک فریمان با نگرشی ویژه به زمین‌ساخت صفحه‌ای

عاطفه نیمروزی\*<sup>۱</sup>، غلامعلی معاف‌پوریان<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد پترولوژی، سازمان زمین‌شناسی مرکز شیراز، شیراز، ایران

۲- استادیار پترولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور اوز، لارستان، ایران

\* عهده‌دار مکاتبات: Atefehnimroozi@yahoo.com

دریافت مقاله: ۹۱/۲/۵، پذیرش مقاله: ۹۱/۵/۲۵

### چکیده

مجموعه سنگ‌های فرامافیک- مافیک و میان لایه‌های رسوبی شرق خطواره تربت جام- فریمان را در بسیاری از منابع، نمایانگر آثار زمین‌درز دیرینه‌تتیس دانسته و به عنوان افیولیت‌های پالئوزوئیک معرفی کرده‌اند. مطالعات ما بر روی واحدهای آذرین مجموعه یاد شده با یافته‌هایی همراه بوده که لزوم بازنگری در دیدگاه ذکر شده را ضروری می‌سازد. برای مثال، مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی نشانگر ماهیت آتشفشانی تا کم‌عمق سنگ‌های فرامافیک- مافیک است و ویژگی‌های ژئوشیمیایی این سنگ‌ها نیز با ماگماهای تشکیل شده در محیط‌های فرورانش و حاشیه‌های سازنده مانند مورب یا حوضه‌های حاشیه‌ای تفاوت دارند. مشاهدات بافتی شامل انواع بافت‌های ناتعادلی میکروسکوپی احتمالاً از فروتافت مذاب‌های فراتافته حکایت دارد. براساس داده‌های عناصر اصلی، فرعی و کمیاب و همچنین با توجه به الگوهای REE و عنکبوتی مجموعه سنگی مورد بحث را می‌توان به انواع کماتیتی، پیکریتی و تولیتی تقسیم کرد ضمن آنکه نسبت‌های عناصر ناسازگار و نامتحرک مانند  $(\text{Nb}/\text{Th})_N$  در برابر  $(\text{Nb}/\text{La})_N$ ،  $\text{Nb}/\text{Th}$  در برابر  $\text{Zr}/\text{Y}$  و  $\text{La}/\text{Yb}$  در برابر  $\text{Th}/\text{Ta}$  بیشتر به نسبت‌های ملاحظه شده در بازالت‌های مربوط به جایگاه دشت‌های اقیانوسی (OPB) شباهت دارد. با توجه به ارتباط نزدیک مکانی و زمانی انواع مختلف سنگ‌ها در مجموعه مورد مطالعه، در قالب یک توالی آتشفشانی- رسوبی واحد، و همچنین با استناد به موقعیت نمونه‌ها در نمودار نسبت  $\text{Zr}/\text{Y}$  در برابر  $\text{Nb}/\text{Y}$  که بالاتر از خط  $\Delta\text{Nb}$  قرار می‌گیرند، می‌توان منشأ گرفتن مذاب‌های مربوط را از منبع ناهمگن پلوم گوشته‌ای محتمل دانست. این نتیجه‌گیری با محتوای بالای  $\text{MgO}$  در سنگ‌ها و میزان بالای  $\text{Fo}$  (حداکثر  $\text{Fo}=0.93$ ) در الیوین‌های ملاحظه‌شده در نمونه‌های کماتیتی و پیکریتی همخوانی دارد.

واژه‌های کلیدی: فرامافیک- مافیک، خطواره فریمان- تربت جام

### ۱- مقدمه

پرمین پیشین نسبت داده‌اند. بیشتر نویسندگان، مجموعه سنگ‌های مورد بحث را در ردیف سنگ‌های افیولیتی قرار داده و آنها را به عنوان آثار زمین‌درز دیرینه‌تتیس معرفی می‌کنند (مانند Berberian, (1981), Alavi, (1979), Stocklin, (1977), Diefenbach et al., (1986)) اما نظر Majidi, (1983) و سبزه‌یی (۱۳۷۴) متفاوت بوده و سری سنگی یادشده را به عنوان یک توالی آتشفشانی- رسوبی عادی شامل گدازه‌های فرامافیک- مافیک مگماکی تولیتی غنی از  $\text{MgO}$  با گرایش کماتیتی معرفی می‌نمایند. اختلاف نظر یادشده بسیار اساسی و غیر قابل قبول بوده زیرا هر یک از دیدگاه‌های مطرح شده، مضامین ژئودینامیکی متفاوتی را در بر دارند. در مقاله حاضر سعی شده است که با استفاده از مشاهدات صحرایی، میکروسکوپی و به‌ویژه داده‌های ژئوشیمیایی مربوط به طیف کامل عناصر کمیاب رایج در مطالعات سنگ‌شناختی که با روشی مطمئن و در آزمایشگاه‌های معتبر تهیه شده است ابتدا به تشریح ویژگی‌های ژئوشیمیایی واحدهای آذرین در توالی مورد بحث پرداخته شود و سپس بر پایه نتایج حاصل، نظر خود را در مورد جایگاه زمین‌ساختی تشکیل این سنگ‌ها، مطرح می‌نماییم.

در مقاله حاضر براساس مشاهدات صحرایی و با استفاده از داده‌های عناصر اصلی، فرعی و کمیاب ۱۵ نمونه مافیک و فرامافیک به بررسی سنگ‌زایی سنگ‌های فرامافیک- مافیک شرق فریمان می‌پردازد. این واحد در تناوب با لایه‌های رسوبی تخریبی و آهکی، به صورت رخنمون‌های پراکنده در مناطق شمالی و شرقی فریمان دیده می‌شوند و در حقیقت بخشی از مجموعه رخنمون‌های پراکنده متشکل از توالی واحدهای فرامافیک- مافیک و لایه‌های رسوبی شمال خطواره فریمان- تربت جام به‌شمار می‌آیند. توالی مورد بحث افزون بر شرق فریمان به‌طور عمده در نواحی غرب مشهد، شمال تربت جام و در شمال روستای آق‌در بند نیز دیده می‌شود. در ناحیه شرق فریمان رخنمون‌های یادشده را به‌ویژه در مناطق شمالی و شمال‌شرق سفیدسنگ می‌توان دید. سن این سنگ‌ها براساس مطالعات انجام‌شده بر روی ریزفسیل‌های یک نمونه آهکی توسط Bozorgnia, (1973) آسیلین تا ساکمارین تعیین شده است. افزون بر این، Kozur & Mostler, (1991) براساس کنودونت‌های مشاهده‌شده در یک نمونه چرت قرمز رنگ، زمان تشکیل این سنگ‌ها را به بخش بالای

## ۲- روش‌های تجزیه و تهیه داده‌های ژئوشیمیایی

آماده‌سازی نمونه‌ها و تهیه پودر نمونه‌ها با استفاده از هاون‌های آگات در دانشگاه دورهام انگلستان انجام پذیرفت. داده‌های عناصر اصلی، فرعی و عناصر کمیاب Cr, Zr و Sc به روش XRF و با استفاده از طیف‌سنج مدل PW2404 در دانشگاه ادینبورگ تهیه شده است. جزئیات روش، شامل نحوه تهیه دیسک‌های شیشه‌ای و قرص‌های پودر فشرده که به ترتیب از آنها در تجزیه عناصر اصلی و کمیاب استفاده شده، توسط Fitton et al., (1998) ارائه شده است و در اینجا تنها به درج مقادیر  $\sigma$  و rmsd که به ترتیب معیار دقت و درستی داده‌ها به‌شمار می‌روند، اکتفا شده است. داده‌های مربوط به دیگر عناصر کمیاب در دانشگاه دورهام و با روش ICP-MS با استفاده از دستگاه Elan 6000 Perkin Elmer Scie تهیه شده است. مقادیر S.D (انحراف معیار) و R.S.D (انحراف معیار نسبی) داده‌ها که به ترتیب معیارهای کیفی درستی و دقت داده‌ها به‌شمار می‌روند، براساس نتایج حاصل از تجزیه نمونه‌های تکراری، نمونه‌های Blank و استانداردها تعیین شده‌اند. داده‌های مربوط به شیمی بلورهای الیوین در دانشگاه ادینبورگ و با استفاده از دستگاه ریزکاو الکترونی مدل CAMECA SX100 تهیه شده است. کلیه تجزیه‌ها در شرایط شعاع الکترونی 15 Kv ولتاژ متناوب، جریان 20 nA و اندازه نقاط 1 um انجام پذیرفته است.

## ۳- نمونه برداری و مشاهدات صحرایی

نمونه برداری از گسترده‌ترین رخنمون واحدهای سنگی مورد بحث که در 15 کیلومتری از مسیر سفیدسنگ به شاهان گرماب واقع شده، انجام شده است. براساس مشخصه‌های ظاهری مانند رنگ، بافت و نوع رخنمون به سادگی می‌توان سنگ‌های مافیک و فرامافیک را روی زمین از یکدیگر تشخیص داد. نمونه‌های مافیک اغلب دارای رنگ تیره مایل به سبز و یا سبز بوده و بافت ناپیدا (Aphanitic) تا ریزدانه دارند و اغلب به صورت سیل‌هایی با ضخامت متفاوت 2 تا 20 متر، در مواردی به صورت گدازه و به ندرت به صورت دایک دیده می‌شوند. نمونه‌های فرامافیک رنگ تیره مایل به خاکستری و بافت ناپیدا دارند و اغلب به صورت روانه‌های گدازه با سیمای برشی، بالشی تا توده‌های مشاهده می‌شوند (شکل 1). توسعه بر گوارگی در حد رخ اسلیتی در رسوباتی پلیتی توالی مورد بحث، با چیرگی میدان تنشی که در آن  $\sigma_1$  در جهت قائم است، همخوانی دارد. پیدایش چنین میدان تنشی را براساس استقرار توام با اعمال فشار توده گرانیتیویدی که بروزدهای آن در امتداد خطواره تربت‌جام- فریمان به‌فراوانی مشاهده می‌شود، بهتر می‌توان توجیه کرد تا عملکرد نیروهای کوهزایی وابسته به همگرایی صفحات، زیرا در این شرایط در میدان تنش حاکم،  $\sigma_1$  در جهت افقی قرار داشته و انتظار می‌رود که بر گوارگی به موازات سطح محوری چین‌ها توسعه یافته باشد.



شکل 1- گدازه‌های فرامافیک با ساختار بالشی، دید به سمت جنوب باختری

## ۴- سنگ‌شناسی

در این بخش به صورت خلاصه به بیان برخی ویژگی‌های مهم سنگ‌شناختی سنگ‌های فرامافیک و مافیک در توالی مورد بحث خواهیم پرداخت.

### ۴-۱- سنگ‌شناسی سنگ‌های فرامافیک

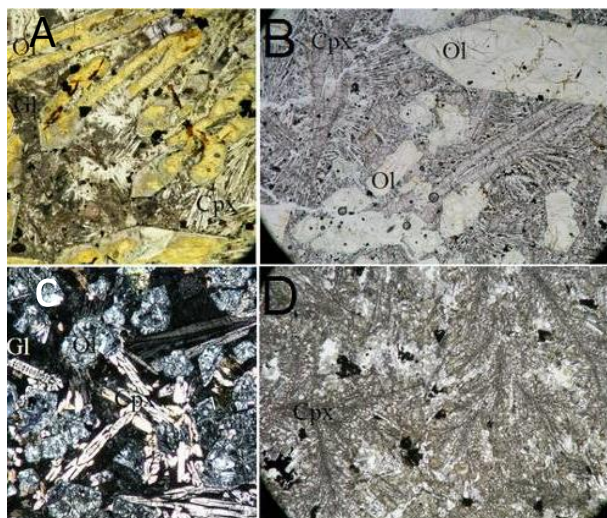
در سنگ‌های فرامافیک منطقه مورد مطالعه که اغلب به صورت گدازه‌های بالشی و توده‌ای دیده می‌شوند (شکل 1) انواع بافت‌های نامتعادل و انباشتی را به صورت الیوین‌های کشیده و توخالی (Hopper)، پیروکسن‌های توخالی، اسکلتی، سوزنی شکل و تارمانند با آرایش شعاعی می‌توان مشاهده کرد (شکل‌های 2). به نظر Vernon, (2004) شکل‌های نامتعادل ذکر شده در شرایطی که میزان D/G یا نسبت آهنگ انتشار به آهنگ رشد بالا باشد، پدیدار می‌شوند. (1994) Arndt, نیز بر نقش تعیین‌کننده فروتافت مذاب‌های کماتیتی که پیشتر فراتافته شده‌اند، در ارتباط با پیدایش بافت اسپینفکس که خود شامل شکل‌های نامتعادل بلورهای الیوین و پیروکسن است، تأکید می‌کند. افزون بر این، مطالعات تجربی (Lofgren, 1983) گویای آن است که شکل‌های نامتعادل بلوری، زمانی که مذاب بازالتی در معرض گرمایش تا دمای بالاتر از  $1190^{\circ}\text{C}$  قرار گرفته، توسعه یافته است و در مذاب‌های که حداکثر به دمای  $1180^{\circ}\text{C}$  رسیده‌اند، بلورهای تشکیل شده دارای شکل‌های هم‌بعد و ساختار یکپارچه بوده‌اند (Solid). بنابراین بافت‌های نامتعادل مشاهده‌شده در سنگ‌های فرامافیک و مافیک فریمان را می‌توان حاصل فروتافت مذاب‌های فراتافته‌ای دانست که دماهای بالاتر از حد معمول داشته‌اند.

داده‌های عناصر اصلی و فرعی براساس وزن خشک، مجدداً محاسبه شده است. میزان LOI به داده‌های اصلی و قبل از محاسبه مجدد درصد وزنی سازنده‌ها بر حسب وزن خشک مربوط می‌شود. عدد منیزیم (Mg-no) با این فرض که میزان  $\text{Fe}^{3+}$  برابر با ده درصد آهن کل بوده، محاسبه شده است.  $\text{Sam.Re}$  و  $\text{Ins.Re}(\sigma)$  به ترتیب قابلیت تولید دوباره داده‌ها توسط دستگاه و نمونه را نشان داده و نشان‌دهنده دقت دستگاه و کیفیت پودر تهیه شده است و  $\text{Ac}(\text{rmsd})$  نمایانگر درستی داده‌ها بر حسب میانگین ریشه انحراف معیار است.

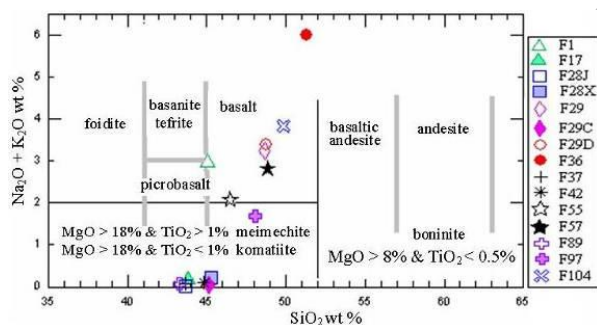
### ۴-۲- سنگ‌شناسی سنگ‌های مافیک

سنگ‌های مافیک به صورت سیل‌هایی با ضخامت 2 تا 20 متر و یا جریان‌های گدازه با گسترش محدود و ضخامت کمتر از 10 متر و در یک مورد به صورت دایک با ضخامت نزدیک به 5 متر مشاهده شد. بافت این سنگ‌ها در نمونه دستی به نوع رخنمون بستگی دارد، به گونه‌ای که در سیل‌های کم‌ضخامت و گدازه‌ها، بافت سنگ آفانیتییک و در سیل‌های ضخیم‌تر ریزبلور تا فانریتییک شامل دانه‌های تیره و روشن، به ترتیب

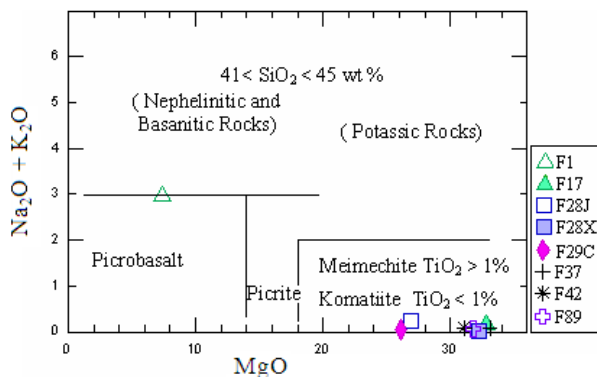
$$[Al_2O_3] = Al_2O_3 / (2/3 - MgO - FeO) ; [TiO_2] = TiO_2 / (2/3 - MgO - FeO)$$



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی از بافت‌های نامتعادل ملاحظه‌شده در سنگ‌های فرامافیک و مافیک فریمان. تصاویر A, B, D در وضعیت PPL با عرض 3mm است. تصویر C در وضعیت XPL با عرض 1.5mm



شکل ۳- نام‌گذاری نمونه‌های فریمان با استفاده از نمودار سیلیس در برابر مجموع قلیایی‌ها (LeBas, 2000)



شکل ۴- نام‌گذاری نمونه‌های فریمان با استفاده از نمودار MgO در برابر مجموع قلیایی‌ها (LeBas, 2000)

پیروکسن و پلاژیوکلاز است. در سنگ‌های مافیک که درجه فروتافت، در بالاترین حد خود بوده بلورهای پیروکسن به شکل شاخه‌ای و درهم‌رشدی با پلاژیوکلازهای سوزنی‌شکل دیده می‌شود (شکل ۲- D). در نمونه‌هایی که درجه فروتافت مذاب پایین‌تر است، پیروکسن به صورت بلورهای هم‌بعد درهم‌رشدی با پلاژیوکلازهای تیغه‌ای مشاهده می‌شود و بالاخره در سیل‌های ضخیم این کانی‌ها را به صورت مجزا و بلورهای پیروکسن هم‌بعد و پلاژیوکلاز لوحه‌ای دیده می‌شود. فراوانی پلاژیوکلاز و اسفن در سنگ‌های مافیک و نبود این کانی‌ها در نمونه‌های فرامافیک به خوبی با میزان بالاتر  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  و قلیایی‌ها در مذاب‌های مافیک، در مقایسه با مذاب‌های فرامافیک مطابقت دارد. اختلاف ترکیبی یادشده ممکن است حاصل درجات پایین‌تر ذوب‌بخشی منبع گوشته‌ای مشترک در تشکیل مذاب‌های مافیک و یا تبلور تفریقی الیوین و کلینوپیروکسن از مذاب‌های فرامافیکی باشد که به عنوان ماگمای والد مذاب‌های مافیک در نظر گرفته می‌شوند.

## ۵- رده‌بندی و نام‌گذاری سنگ‌ها

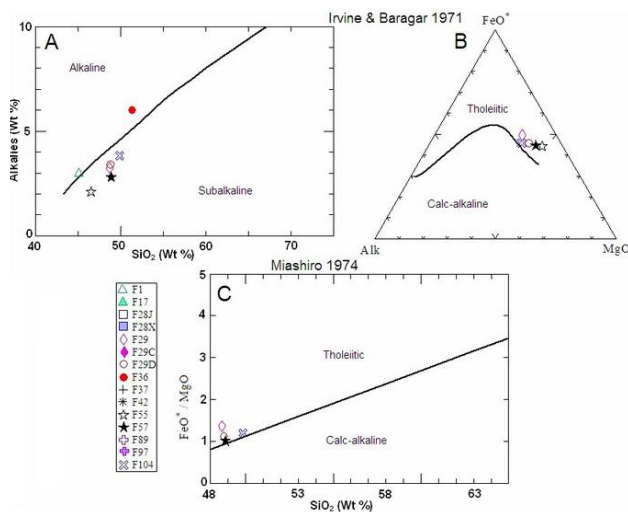
در شکل‌های ۳ و ۴ با استفاده از آخرین نمودارهای ارائه‌شده توسط IUGS در نام‌گذاری سنگ‌های آتشفشانی غنی از MgO (Lebas, 2000) به دسته‌بندی و نام‌گذاری نمونه‌های مورد مطالعه پرداخته شده است. با توجه به این نمودارها نمونه‌های F97, F89, F42, F37, F29C, F28X, F28J, F17 میمیکت‌ها قرار گرفته‌اند با توجه به میزان  $TiO_2 < 1\%$  به عنوان کماثیت، نمونه F1 با عنوان پیکروبازالت و نمونه‌های F57, F55, F36, F29D, F29, F1 به عنوان بازالت طبقه‌بندی می‌شوند. در تقسیم‌بندی جزئی‌تر، نمونه‌های بازالتی با استفاده از نمودار تغییرات سیلیس در برابر مجموع قلیایی‌ها (Irvine & Baragar, 1971) (شکل ۵- A) می‌توان مشاهده کرد که به استثنای نمونه‌های F36, F1 که در زمره بازالت‌های قلیایی قرار دارند دیگر نمونه‌ها در ردیف بازالت‌های نیمه‌قلیایی قرار داشته که با توجه به نمودار شکل ۵- B دارای گرایش تولیتی هستند.

با توجه به کاربرد گسترده و اختصاصی نمودار مثلثی Jensen & Pyke (1982) جهت نام‌گذاری سنگ‌های آتشفشانی غنی از MgO ما نیز از این نمودار جهت نام‌گذاری نمونه‌های فریمان استفاده نموده‌ایم (شکل ۶) و همانگونه که ملاحظه می‌گردد نمونه‌های مورد بحث به عنوان کماثیت، بازالت کماثیتی، تولیت غنی از MgO و توله‌ایت غنی از آهن تقسیم می‌گردند. با توجه به آثار ترکیبی ناشی از انباشت بلورهای الیوین در مذاب، Hanski et al., (2001) جهت دسته‌بندی و نام‌گذاری سنگ‌های آتشفشانی غنی از MgO از نسبت‌های مولی آلومین ( $[Al_2O_3]$ ) و تیتان ( $[TiO_2]$ ) از میزان واحد استفاده می‌نماید. معیارهای دسته‌بندی در این نمودار (شکل ۷) با استفاده از معادلات ویژه به گونه‌ای محاسبه می‌گردند تا موقعیت هر نمونه در این نمودار نمایانگر تصویر ترکیب سنگ از قطب الیوین باشد تا به این ترتیب از ورای تاثیر انباشت بلورهای الیوین ترکیب نمونه‌ها بررسی و با یکدیگر مقایسه شود. معادلات مورد استفاده به قرار زیر می‌باشد:

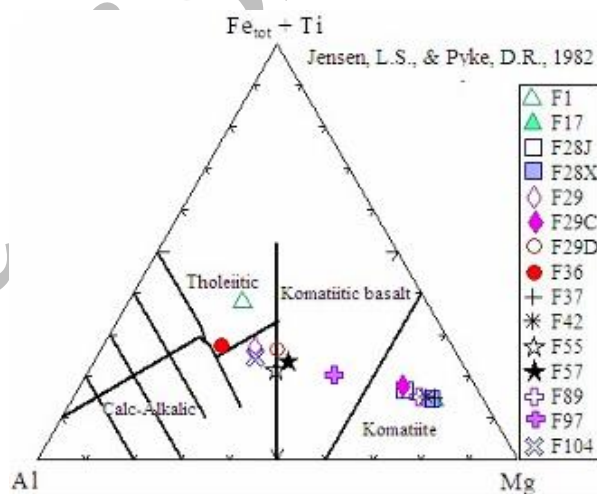
با توجه به نمودار شکل ۷ به روشنی می‌توان دریافت که برخی سنگ‌های فرامافیک-مافیک فریمان شامل نمونه‌های F1, F42, F37, F36, F29D, F104, F97, F57, F55, F89 نیز در ردیف کمانتیت‌های غنی‌شده از تیتانیوم قرار دارند (نمونه‌های F29C, F29, F28X, F28J که در مرز بین محدوده‌های تعیین‌شده برای کمانتیت‌های تهی‌نشده از آلومینیم و بونیت‌ها قرار دارند تا حدودی بحث‌انگیز بوده و در بخش‌های بعد بیشتر به این مسئله پرداخته خواهد شد.

### ۶- بررسی ژئوشیمی نمونه‌ها

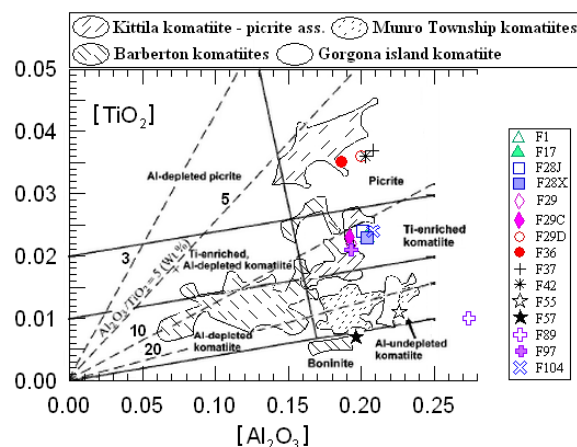
بحث درباره ژئوشیمی نمونه‌های مورد مطالعه را با بررسی احتمال آلیش مذاب‌ها آغاز می‌نماییم. به‌نظر (Kerrich, 1999b), آن دسته از بازالت‌های آرکنن ایالت Superior که توسط پوسته آلوده شده‌اند، به‌طور شاخص از نسبت‌های  $(La/Sm)_N > 1.5$  و  $Th/Ce > 0.05$  برخوردار هستند (نسبت  $La/Sm$  برحسب مقادیر گوشته اولیه Sun & McDonough, 1989) به‌نچار شده است). (Condie, 2003) در بررسی نسبت‌های عناصر ناسازگار در بازالت‌های اقیانوسی و کمانتیت‌ها به منظور تفکیک نمونه‌های آلوده از نسبت  $Nb/Th < 5$  به‌عنوان معیار آلودگی پوسته‌ای قابل توجه و بیشتر از ۵ درصد استفاده کرده است. با در نظر گرفتن نسبت‌های یادشده و مقایسه آنها با مقادیر ملاحظه‌شده در نمونه‌های فریمان، می‌توان دریافت که براساس نسبت‌های  $(La/Sm)_N$  تنها نمونه‌های F89, F57, F55 و با توجه به نسبت‌های  $Th/Ce$  این سه نمونه و نمونه F1 را می‌توان به‌عنوان نمونه‌های آلوده در نظر گرفت، اما براساس دیگر معیار آلودگی، یعنی نسبت‌های  $Nb/Th < 5$ ، هیچ یک از نمونه‌ها را نمی‌توان در ردیف نمونه‌های آلوده قرار داد. با این وجود، براساس این معیار نیز سه نمونه F89, F57, F55 با توجه به برخورداری بودن از پایین‌ترین نسبت‌ها بیش از دیگر نمونه‌ها مشکوک به آلودگی هستند. بنابراین با توجه به نسبت‌های بالای  $Nb/Th$  در همه نمونه‌ها و با در نظر گرفتن این واقعیت که کاهش نسبت  $Nb/Th$  معمولاً تحت تاثیر آلیش پوسته‌ای و یا در مناطق فرورانش در نتیجه دخالت سیالات نشأت‌گرفته از قطعه فرورانده در فرایند تشکیل ماگما دیده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که میزان آلیش مذاب‌ها به استثنای سه نمونه ذکرشده، ناچیز بوده و احتمالاً عاملی که باعث افزایش نسبت‌های  $(La/Sm)_N$  و  $Th/Ce$  در نمونه‌های مشکوک به آلودگی شده با آنچه که در مناطق فرورانش عامل آلیش به‌شمار می‌رود، یعنی محلول‌های آبی غنی از عناصر ناسازگار متحرک (عناصر LIL) و فقیر از عناصر ناسازگار نامتحرک (عناصر HFS)، تفاوت داشته است. محلول‌های آبی در مناطق فرورانش و یا در پوسته قاره-ای از یک سو، افزایش عناصر لیتوفیل با شعاع یونی بالا (عناصر LIL) مانند  $Th$  و از سوی دیگر، کاهش عناصر با پتانسیل یونی بالا، یا گروه HFSE و از جمله  $Nb$  را سبب می‌شوند. (Sun & Nesbitt, 1978a) تحرك بیشتر عناصر خاکی کمیاب سبک (LREE) در مقایسه با عناصر خاکی کمیاب سنگین (HREE) را در خلال وقایع دگرسانی مطرح و به‌ویژه به تحرك بیشتر عناصر  $Eu$  و  $Ce$  با توجه به ظرفیت‌های اکسایش مختلف



شکل ۵- بررسی نمونه‌های بازالتی فریمان با استفاده از نمودارهای ارائه شده توسط Irvine & Baragar, (1971) برای تفکیک انواع بازالت‌ها

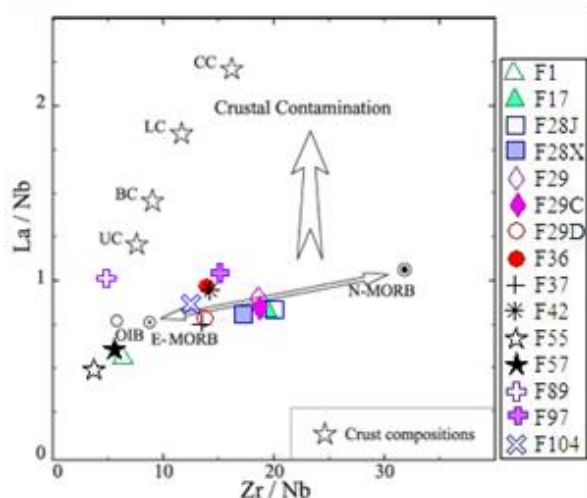


شکل ۶- نام‌گذاری نمونه‌های فریمان با استفاده از نمودار مثلثی (Jensen & Pyke, 1982)

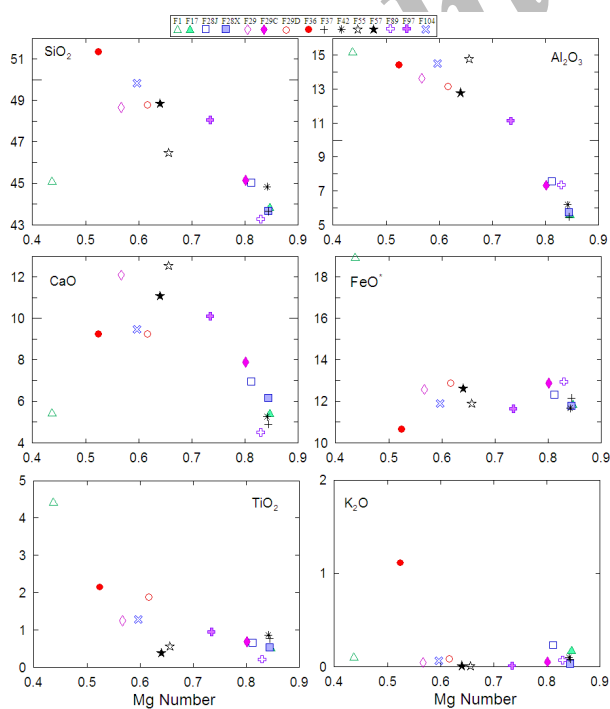


شکل ۷- موقعیت نمونه‌های فریمان در نمودار نسبت مولی  $TiO_2$  در برابر  $Al_2O_3$  (Hanskil, 2001)، در مقایسه با موقعیت مجموعه کمانتیت-پیکریت Kittila و کمانتیت‌های مونرو، باربرتون و گورگونا

در پریدوتیت گوشته‌ای به‌شمار می‌روند. در همین نمودار با توجه به موقعیت متمایز سه نمونه F89, F57, F55 که از نسبت‌های بسیار بالا  $\text{CaO}/\text{TiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  برخوردار هستند، می‌توان احتمال وجود یک منبع گوشته‌ای متمایز و تهی‌شده از تیتان را در زمینه تشکیل این سنگ‌ها مطرح کرد.

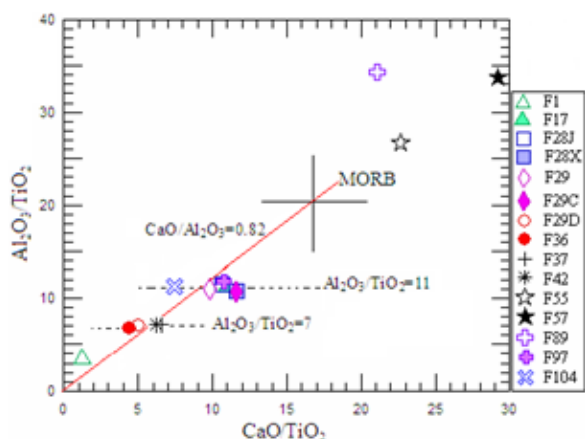


شکل ۸- پراکندگی نمونه‌های فرامافیک- مافیک فریمان در نمودار نسبت  $\text{Zr}/\text{Nb}$  برابر نسبت  $\text{La}/\text{Nb}$  به گونه‌ای است که احتمال آلودگی مذاب توسط ترکیبات پوسته‌ای، به میزان قابل توجه را منتفی می‌سازد (Briand, 2002). حروف اختصاری در این نمودار عبارتند از: CC پوسته قاره‌ای، LC پوسته زیرین، BC ترکیب پوسته به صورت کل، UC پوسته بالایی

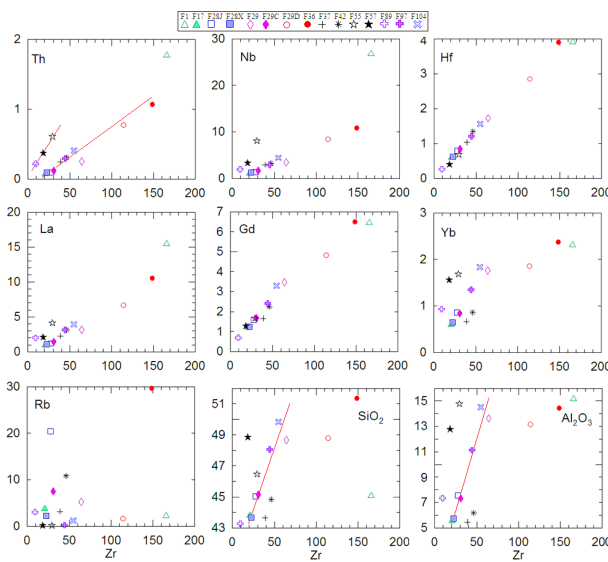


شکل ۹- نحوه تغییرات عدد منیزیم در برابر اکسیدهای عناصر اصلی و فرعی نمونه‌های فرامافیک- مافیک فریمان.  $\text{FeO}^*$  میزان آهن کلی را نشان می‌دهد

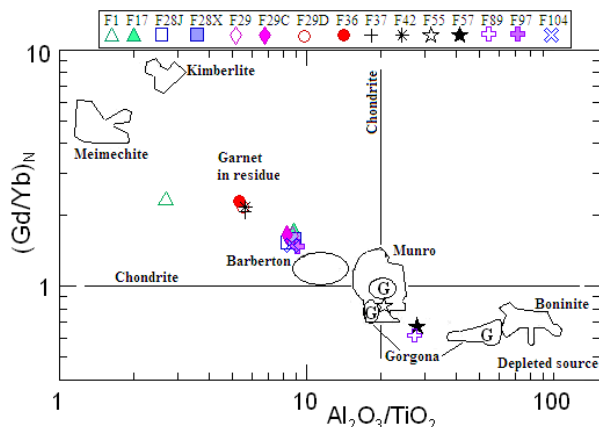
آنها تاکید کردند. به این ترتیب، از دست رفتن بخشی از Ce موجود در نمونه‌های F89, F57, F55 در جریان دگرسانی که با توجه به مشاهدات بافتی مشهود بوده، ممکن است به افزایش نسبت  $\text{Th}/\text{Ce}$  در این نمونه‌ها منجر شده باشد. با این وجود، تفسیر مطرح‌شده نسبت‌های بالاتر  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  را در این نمونه‌ها توضیح نمی‌دهد و در این زمینه باید به امکان وجود یک سنگ منشأ متفاوت و غنی‌شده توسل جست. در شکل ۸ موقعیت نمونه‌های فرامافیک- مافیک فریمان در نمودار نسبت  $\text{Zr}/\text{Nb}$  در برابر نسبت  $\text{La}/\text{Nb}$  که توسط Briand, (2002) به‌منظور بررسی احتمال آلودگی پوسته‌ای ماگما ارائه شده، نشان داده شده است. همان‌گونه که در این نمودار دیده می‌شود، روند نمونه‌های فریمان که به‌صورت کاهش تدریجی این نسبت‌ها دیده می‌شود، به گونه‌ای است که بیشتر با غنی‌شدگی و یا کاهش درجه ذوب‌بخشی مطابقت دارد تا آلودگی توسط ترکیبات مختلف پوسته‌ای. شکل ۹ نحوه تغییرات عدد منیزیم را در برابر اکسیدهای عناصر اصلی و فرعی در نمونه‌های فرامافیک- مافیک فریمان نشان می‌دهد. پراکندگی نمونه‌ها در این نمودارها به گونه‌ای است که نمی‌توان ارتباط بین نمونه‌های فرامافیک و مافیک را براساس تبلور تفریقی الیومین و پیروکسن مطرح کرد. برای مثال، در نمودار عدد منیزیم در برابر آهن کل برخلاف آنچه در جریان تبلور تفریقی انتظار می‌رود، می‌توان عدم افزایش میزان آهن از نمونه‌های فرامافیک تا مافیک را ملاحظه کرد. در شکل ۱۰ نیز که تغییرات  $\text{Zr}$  در برابر برخی عناصر کمیاب، سیلیس و آلومین نمایش داده شده است، می‌توان روندهای متفاوتی را مشاهده کرد که احتمال تعلق نمونه‌های مورد مطالعه را به یک سری تفریقی واحد، منتفی می‌سازد. در این شکل، دو روند متمایز مشاهده‌شده در نمودارهای  $\text{Zr}$  در برابر  $\text{La}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Th}$  را براساس ناسازگاری بیشتر عناصر یادشده در مقایسه با  $\text{Zr}$  و اختلاف درجه ذوب‌بخشی و یا وجود منابع گوشته‌ای متفاوت از نظر محتوای عناصر کمیاب ناسازگار (که به میزان غنی‌شدگی یا تهی‌شدگی آنها وابسته بوده)، می‌توان توجیه کرد. در همین شکل روندهای پیوسته ملاحظه‌شده در نمودارهای  $\text{Zr}$  در برابر  $\text{Gd}$  و  $\text{Hf}$  حاکی از ژئوشیمی مشابه این عناصر است و می‌توان پراکندگی ملاحظه‌شده در نمودارهای  $\text{Zr}$  در برابر سیلیس و آلومین را براساس وجود منابع گوشته‌ای متفاوت توجیه کرد، ضمن اینکه بهترین خط رسم‌شده از بین نمونه‌های کماتیتی و بازالت کماتیتی را براساس انباشت بلورهای الیومین در نمونه‌های فرامافیک و تفریق این بلورها از مذاب‌های والد که به تشکیل مذاب‌های مافیک منجر شده می‌توان توضیح داد. در شکل ۱۲ می‌توان نسبت‌های تقریباً ثابت  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  و نسبت‌های متغیر  $\text{CaO}/\text{TiO}_2$  را در دو دسته از سنگ‌ها شامل، دسته غنی از تیتان و دسته با محتوای متوسط تیتان ملاحظه کرد. این روند را از جنبه ژئوشیمیایی براساس افزایش نسبی درجه ذوب‌بخشی می‌توان توجیه کرد، اما از آنجا که افزایش درجه ذوب‌بخشی منجر به افزایش نسبت  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  در هر یک از دسته‌ها نشده است، بنابراین می‌توان احتمال داد که ذوب در شرایطی رخ داده که کانی آلومینیم‌دار گوشته یعنی گارنت پایدار بوده و بدین ترتیب ورود  $\text{Al}$  به فاز مذاب با همان سهولت و میزانی که  $\text{Ca}$  وارد شده، امکان‌پذیر نبوده است. ذوب در اعماق زیاد و فشار بالا و شرایط نزدیک به خشک، از جمله عوامل اصلی پایداری گارنت



شکل ۱۱- B- نمودار نحوه تغییرات  $CaO/TiO_2$  در برابر تغییرات  $Al_2O_3/TiO_2$  در برابر تغییرات  $Al_2O_3/TiO_2$  خطوط متقاطع، میزان این نسبت‌ها را در ترکیب کندریتی نشان می‌دهند و خط رسم‌شده مقدار این نسبت‌ها را در نمونه‌های مورب که نسبت‌های کندریتی (Nesbitt et al., 1979) دارند، نشان می‌دهد

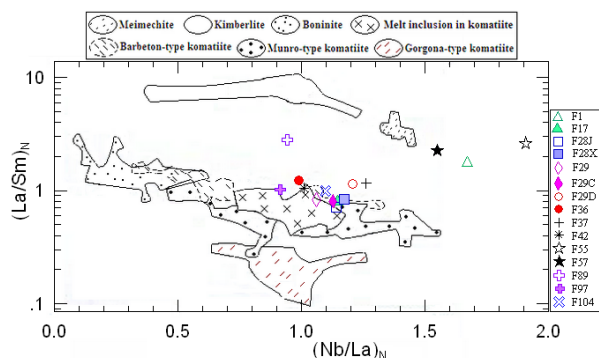


شکل ۱۰- نحوه تغییرات Zr در برابر عناصر کمیاب، سیلیس و آلومین



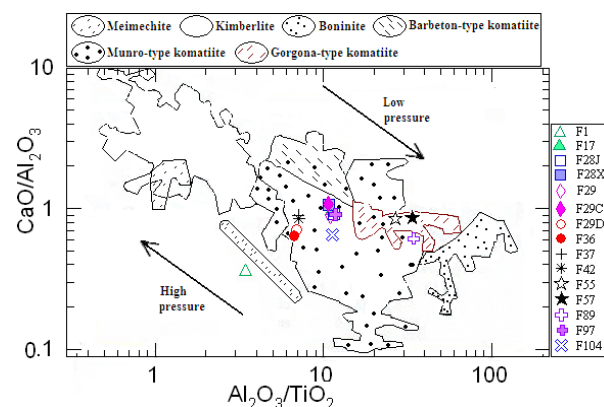
شکل ۱۲- نمودار  $Al_2O_3/TiO_2$  در برابر  $(Gd/Yb)_N$ ، بهنجارشده برحسب نسبت گوشته اولیه

موقعیت دیگر نمونه‌ها در همین شکل نشانگر وجود منبع گوشته‌ای گارنت‌دار است و با توجه به نحوه پراکندگی نمونه‌های F1, F29D, F36, F42, F37 و گسترش آنها به سمت سنگ‌های میمکیتی می‌توان تصور کرد که نمونه‌های غنی از تیتان، به‌ویژه نمونه F1 نمایانگر مذاب‌هایی باشند که در مقایسه با مذاب‌های مربوط به نمونه‌های کاماتیته در نتیجه درجات کمتر ذوب‌بخشی و در فشارهای بالاتر تشکیل شده‌اند.



شکل ۱۳- نمودار نسبت‌های  $Nb/La$  در برابر  $La/Sm$  بهنجارشده برحسب مقادیر گوشته اولیه (Sun & McDonough, 1989) و مقایسه موقعیت نمونه‌های فریمان با دیگر سنگ‌های آتشفشانی غنی از  $MgO$  داده‌ها از (Arndt, 2003)

در شکل ۱۱ موقعیت نمونه‌های فریمان در نمودار نسبت  $Al_2O_3/TiO_2$  در برابر نسبت  $CaO/Al_2O_3$  و در مقایسه با دیگر سنگ‌های آتشفشانی غنی از  $MgO$  که توسط (Arndt, 2003) گردآوری شده ملاحظه می‌شود. کلیه نمونه‌های فریمان بجز نمونه F1 براساس نسبت‌های یادشده در بین دیگر مجموعه‌های کاماتیته واقع شده‌اند. موقعیت سه نمونه F89, F57, F55 که پیش از این سیمای تهی شده از تیتان آنها در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شد، در نمودار اخیر به گونه‌ای است که تشکیل آنها را در پایین‌ترین فشار، در مقایسه با دیگر نمونه‌های فریمان می‌توان استنباط کرد. موقعیت این نمونه‌ها در نمودار  $Al_2O_3/TiO_2$  در برابر  $(Gd/Yb)_N$  (شکل ۱۲) در محدوده مذاب‌های نشأت گرفته از منابع تهی شده، این نتیجه‌گیری را تایید می‌کند زیرا بیشتر سنگ‌شناسان بر این باورند که بخش تهی شده گوشته در سطوح بالایی آن قرار دارد.



شکل ۱۱- A- نمودار  $Al_2O_3/TiO_2$  در برابر  $CaO/TiO_2$  و موقعیت نمونه‌های فریمان در مقایسه با انواع کاماتیته‌ها در مناطق باربرتون، مونرو و گورگونا و همچنین دیگر سنگ‌های آتشفشانی غنی از  $MgO$  شامل میمکیت‌ها، کیمبرلیت‌ها و بونیت‌ها، محدوده مجموعه‌های سنگی از (Arndt, 2003)

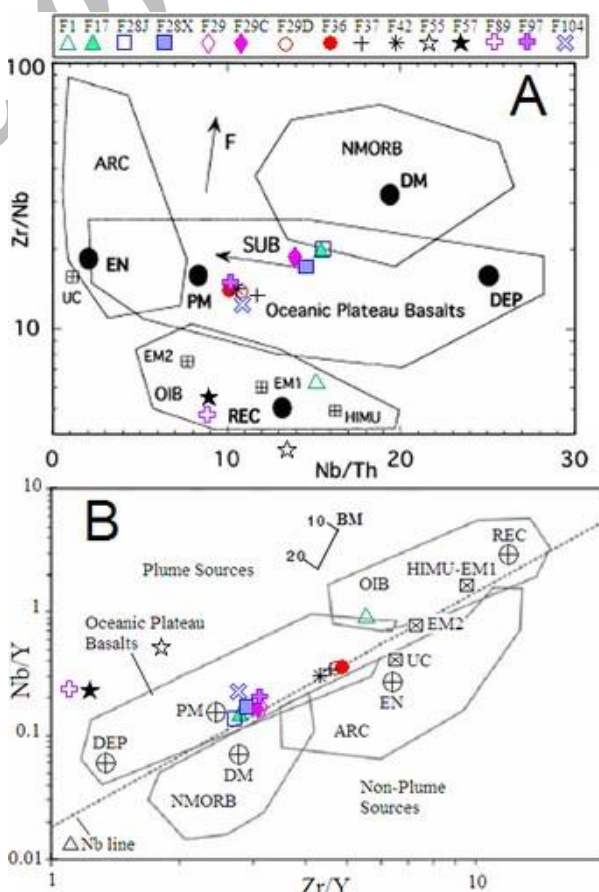
بدین ترتیب می‌توان گرایش نمونه‌های مورد بحث به سمت ترکیبات میمیکیتی را نیز براساس فرایند غنی‌شدگی منبع و درجات پایین ذوب‌بخشی توجیه کرد.

در نمودار نسبت Nb/Th در برابر Zr/Nb (شکل ۱۴-A) هم بجز چهار نمونه یادشده، دیگر نمونه‌ها در محدوده بازالت‌های دشت میان‌اقیانوسی که به نظر سنگ‌شناسان در نتیجه فعالیت پلوم‌های گوشته‌ای تشکیل شده‌اند، قرار می‌گیرند. با ارائه این نمودار (Condie, 2005) سعی داشت تا بر تفسیرهایی تأکید نماید که در پیدایش مذاب‌های بازالتی، دخالت داشته و نقش منابع گوشته‌ای مختلف با ویژگی‌های ژئوشیمیایی متنوع را مطرح سازد. در این نمودار، نمونه‌های کماتیتی و پیکریتی-تولثیتی در فاصله بین ترکیب‌های گوشته اولیه و گوشته تهی‌شده عمیق قرار دارند و ظاهراً از دو منبع گوشته‌ای باروری متفاوت نشأت گرفته‌اند. به این ترتیب، با توجه به عدم حساسیت نسبت Nb/Th به درجه ذوب‌بخشی و حساس بودن نسبت Zr/Nb به این فرایند و با در نظر گرفتن موقعیت این سنگ‌ها که دو اجتماع مجزا را تشکیل می‌دهند به‌نظر می‌رسد که منبع گوشته‌ای نمونه‌های پیکریتی-تولثیتی در مقایسه با منبع نمونه‌های کماتیتی تا حدودی غنی‌تر بوده است، اما احتمالاً مذاب‌های کماتیتی محصول درجات بالاتر ذوب‌بخشی بوده‌اند، ضمن آنکه با توجه به مقادیر تقریباً مشابه نسبت Zr/Nb در چهار نمونه مافیک F97, F36, F29D, F104 و نمونه‌های فرامافیک F42, F37 که اجتماع واحدی را تشکیل می‌دهند و با توجه به حساس بودن این نسبت به درجه ذوب‌بخشی، می‌توان نتیجه گرفت که درجات مختلف ذوب‌بخشی را نمی‌توان عامل اصلی تغییرات Zr/Nb در نمونه‌های یادشده به‌شمار آورد. موقعیت چهار نمونه F89, F1, F55, F57 در مجاورت منابع بازچرخه از وجود یک منبع گوشته‌ای متفاوت در مقایسه با منابع گوشته‌ای مذاب‌های کماتیتی، پیکریتی و تولثیتی حکایت دارد. منبع گوشته‌ای اخیر، از نیوبیم غنی شده و به ترکیبات وابسته به سنگ‌کره اقیانوسی بازچرخه شباهت داشته است. بنابراین دامنه نسبت‌های Nb/Th و Zr/Nb را در نمونه‌های فریمان براساس وجود منابع گوشته‌ای متفاوت بهتر می‌توان توجیه کرد.

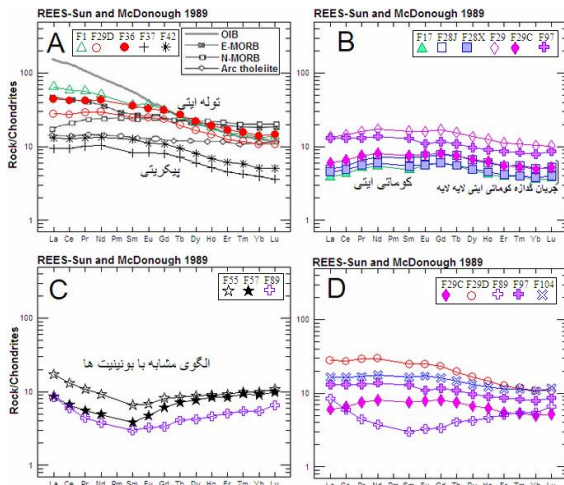
با توجه به موقعیت نمونه‌های فریمان در نمودار نسبت Zr/Y در برابر Nb/Y (شکل ۱۴-B) که بالاتر و یا بر روی خط اختلاف نیوبیم ( $\Delta Nb$ ) قرار دارند، می‌توان نشأت‌گرفتن مذاب‌های مربوطه را از منبع پلوم گوشته‌ای محتمل دانست. به نظر Condie (2005) بازالت‌هایی که در زیر خط  $\Delta Nb$  قرار می‌گیرند یا از یک منبع گوشته‌ای تهی‌شده کم‌عمق (DM) سرچشمه گرفته یا به مناطق فرورانش مربوط بوده و یا نمایانگر آن دسته از بازالت‌های نشأت‌گرفته از پلوم هستند که توسط پوسته قاره‌ای و یا سنگ‌کره زیر قاره‌ای آلوده شده‌اند.

شکل ۱۵ الگوهای REE نمونه‌های فریمان را که برحسب مقادیر کندریتی بهنجار شده‌اند، نشان می‌دهد. به منظور بررسی دقیق‌تر، نمونه‌ها با توجه به شکل الگوها در چهار دسته با الگوهای موازی قرار داده شده و نمودارهای هر دسته به صورت مجزا رسم شده‌اند. دسته اول نمونه‌های مافیک F1, F29D, F36 و نمونه‌های فرامافیک F37, F42 را شامل می‌شود که الگویی مانند سنگ‌های پیکریتی-تولثیتی یا بازالت‌های مورب غنی‌شده (شکل ۱۵-A) دارند. الگوهای موازی در این دسته از وجود یک

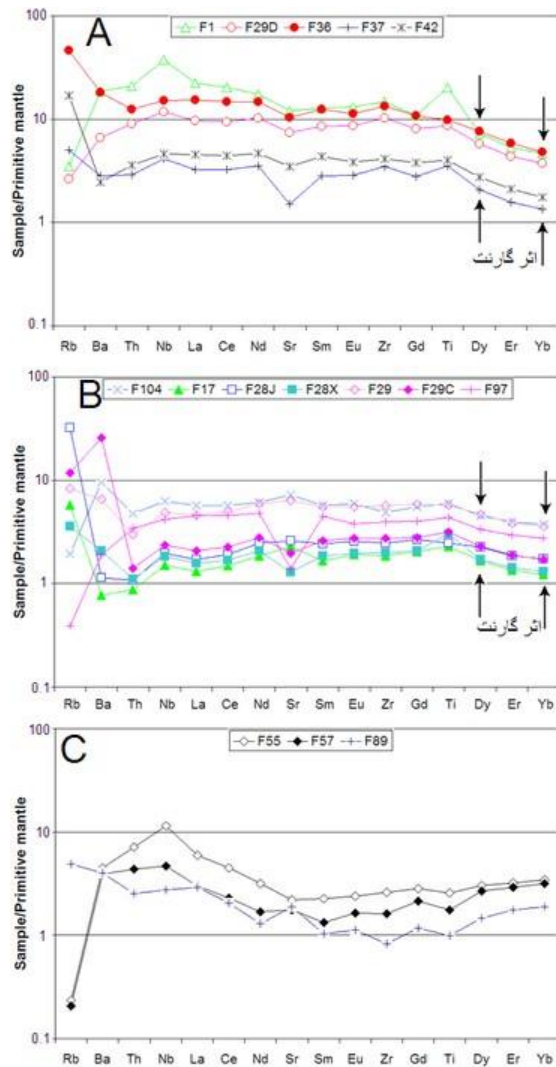
در شکل ۱۳ موقعیت نمونه‌های فریمان در نمودار نسبت‌های Nb/La در برابر La/Sm که برحسب مقادیر گوشته اولیه (Sun & McDonough, 1989) بهنجار گردیده‌اند، در مقایسه با دیگر مجموعه‌های آتشفشانی غنی از MgO شامل میمیکیتی‌ها، کیمبرلیت‌ها، بونینیت‌ها، کماتیت‌های مناطق باربرتون، مونرو، گورگونا و ترکیب مذاب‌های حبس‌شده در دانه‌های الیوین در کماتیت‌ها نشان داده شده است. در این نمودار به استثنای چهار نمونه، دیگر نمونه‌های فریمان در محدوده‌ای مانند کماتیت‌های مونرو، باربرتون و مذاب‌های حبس‌شده در کماتیت‌ها قرار دارند. چهار نمونه دیگر با شماره‌های F89, F57, F55, F1 به سمت ترکیب سنگ‌های میمیکیتی گرایش دارند، اما همین نمونه‌ها در نمودار  $Al_2O_3/TiO_2$  در برابر  $CaO/Al_2O_3$  (شکل ۱۱) در مقایسه با میمیکیت‌ها از آلومینیم غنی‌تر و از تیتانیوم فقیرتر هستند که با برداشت‌های قبلی مبنی بر نشأت‌گرفتن آنها از ذوب منبع گوشته‌ای تهی‌شده در فشارهای پایین‌تر همخوانی دارد. از سوی دیگر، پیش از این براساس نسبت‌های  $(La/Sm)_N$  نمونه‌های F89, F57, F55 و با توجه به نسبت‌های Th/Ce این سه نمونه و نمونه F1 به عنوان نمونه‌های مشکوک به آلودگی معرفی شدند. با این وجود، در جمع‌بندی بحث آلودگی نیز این نتیجه به دست می‌آید که عامل آلودگی، مواد پوسته‌ای نبوده و شاید فرایندی که منجر به بروز نسبت‌های بالا  $(La/Sm)_N$  و نسبت‌های پایین Th/Ce در این سنگ‌ها شده، در حقیقت نوعی فرایند غنی‌شدگی از LREE مانند لاتنان و LILE مانند توریم بوده است.



شکل ۱۴-A و B به ترتیب نمودارهای نسبت‌های Zr/Y در برابر Nb/Th و Nb/Y در برابر Zr/Nb و موقعیت نمونه‌های فریمان در مقایسه با منابع گوشته‌ای و محدوده‌های مربوط به محیط‌های زمین‌ساختی مختلف.  $\mu$  عبارت است از نسبت  $^{238}U/^{204}Pb$ . نمودار A از Condie (2005) و نمودار B از Viruete (2007)



شکل ۱۵- الگوهای مختلف REE در نمونه‌های فریمان (Fang, 2003)



شکل ۱۶- الگوهای عنکبوتی نمونه‌های فریمان، بهنجارشده برحسب مقادیر گوشته اولیه از Sun & McDonough, (1989): A: نمونه‌های پیکریتی- تولنییتی، B: نمونه‌های کمانتییتی و کمانتیت بازالتی و C: نمونه‌های بازالت کمانتییتی با الگوهای REE مشابه بونینیت‌ها

منبع یکسان حکایت دارد، اما سطح بالاتر الگوی نمونه‌های مافیک و به‌ویژه نمونه F1 بیش از مقداری است که صرفاً براساس تبلور تفریقی و یا کاهش درجه ذوب‌بخشی قابل توجیه باشد، بنابراین به‌نظر می‌رسد که با توجه به الگوی متقاطع نمونه‌های F1 و F29D نوع سازوکار ذوب‌بخشی نیز در این زمینه موثر بوده است. به‌عبارت دیگر، فرایند ذوب‌بخشی احتمالاً از نوع دینامیک بوده است.

در شکل‌های ۱۶- A, B, C الگوهای عنکبوتی نمونه‌های فریمان را که برای مقایسه با الگوهای عنکبوتی انواع سنگ‌های آتشفشانی غنی از MgO شامل کمانتیت‌ها، کیمبرلیت‌ها و بونینیت‌ها (شکل ۱۷)، Arndt, (2003)، با استفاده از یک سری خاص از عناصر ناسازگار بهنجارشده برحسب مقادیر گوشته اولیه رسم شده، ملاحظه می‌شود.

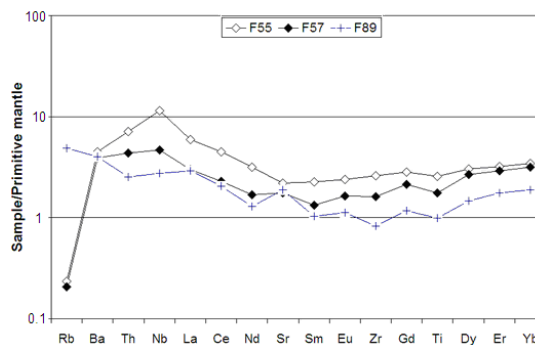
همان‌گونه که انتظار می‌رود با مقایسه این الگوها می‌توان به شباهت کامل الگوی کوهانی شکل نمونه‌های کمانتییتی فریمان با الگوی کمانتیت-های باربرتون و مونرو پی‌برد، اما الگوی هیچ یک از نمونه‌های فریمان را نمی‌توان مشابه الگوی بونینیت‌ها دانست و به‌طور مشخص، مقایسه الگوی نمونه‌های دارای الگوهای U شکل REE (نمونه‌های F55, F89, F57) در شکل ۱۵- C، با الگوی عنکبوتی بونینیت‌ها در شکل ۱۶ از نبود فرازهای Zr, La, Th, Sr و نشیب معروف Nb و نشیب‌های Eu, Sm, Nd در این سنگ‌ها حکایت دارد.

#### ۱-۶- بررسی شیمی بلورهای الیوین

شکل ۱۸ نحوه تغییرات عدد منیزیم ( $Mg^{II} = Mg/Mg+Fe$ ) در برابر تغییرات برخی از سازنده‌های اصلی و فرعی در بلورهای الیوین را نشان می‌دهد. رابطه مستقیم اکسیدهای نیکل و کروم با عدد منیزیم و رابطه عکس اکسیدهای آهن، منگنز، کلسیم با این پارامتر نشانگر تغییرات همسو در شیمی بلورها و مذاب در تعادل با آنها در جریان تبلور تفریقی است. افزون بر این، با توجه به مشاهدات سنگ‌نگاری مبنی بر وجود بلورهای هم‌بعد و خودشکل الیوین که در مواردی به صورت نوک‌تیز یا توخالی (شکل‌های ۲- A و B) و حاوی مذاب حبس شده بوده‌اند و همچنین عدم وجود آثار کرنش در بلورهای الیوین، می‌توان اطمینان داشت که بلورهای الیوین، اعم از درشت‌بلورها و یا ریزبلورهای الیوین در زمینه، حاصل تبلور مذاب بوده و نمی‌توان آنها را به عنوان بیگانه‌بلورهای وابسته به متلاشی شدن بیگانه‌سنگ‌های سنگ‌کراهی که در ماگما پراکنده شده‌اند، تفسیر کرد. بنابراین می‌توان از بالاترین میزان Fo برای برآورد ترکیب مذاب والد و مقدار MgO آن استفاده کرد. در شکل ۱۹- A براساس میزان Fo در بلورهای الیوین و استفاده از منحنی تعادلی الیوین- مذاب (Nisbet, 1993) به برآورد مقدار MgO مذاب در تعادل با این بلورها پرداخته شده است. در این شکل نمی‌توان از دامنه کامل مقدار Fo ملاحظه شده در بلورها که بین 0.84 تا 0.93 در نوسان بوده است، استفاده کرد، بنابراین با استفاده از معادله  $MgO = 55 * Fo^{11.5}$  (Nisbet, 1993)، میزان MgO در مذاب براساس میزان Fo در بلورهای الیوین و منحنی تعادلی، برآورد شده است. با توجه به موقعیت بلورهای الیوین نمونه‌ها، می‌توان تأثیر انباشت الیوین را در افزایش میزان MgO ترکیب سنگ کل ملاحظه کرد.

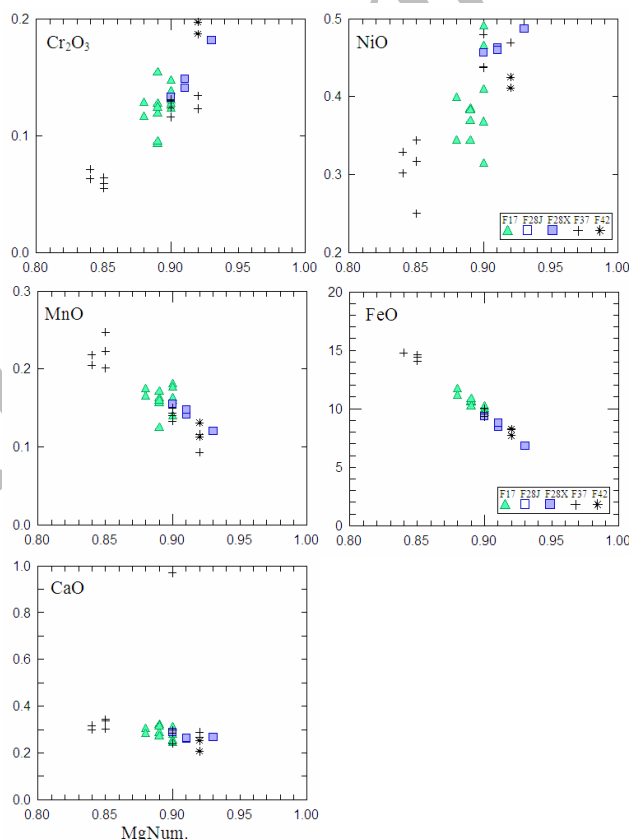


شکستگی‌ها در بلور مورد بحث و با توجه به مقادیر یکسان Fo از بخش هسته تا حاشیه بلور یادشده، می‌توان نتیجه گرفت که پایین‌بودن عدد منیزیم در این بلور احتمالاً به تبادلات یونی رخ داده در خلال دگرگونی، مرتبط بوده است. در شکل ۱۹- B با استفاده از بالاترین میزان Fo در بلورهای الیون، میزان دمای مذاب در تعادل با بلور را براساس سه مدل مختلف بین حداقل  $1480^{\circ}\text{C}$  براساس مدل (Nisbet, 1982) و حداکثر  $1570^{\circ}\text{C}$  براساس مدل (Niu, 2002a) برآورد شده است و از آنجا که دماهای برآوردشده نمایانگر دمای تعادلی ذوب یا تبلور بلورهای الیون است، بنابراین ناگزیر بر منحنی ذوب این کانی قرار داشته و با استفاده از شیب تغییرات آدیباتیک دما در گوشته در حال صعود به میزان  $1.8^{\circ}\text{C/kbar}$  به برآورد دمای بالقوه منبع گوشته‌ای مذاب‌های فریمان در شکل ۱۹- C پرداخته شده است. به‌طور کلی دماهای برآوردشده، فراتر از حدی است که از یک محیط فرورانش و یا MORB عادی می‌توان انتظار داشت و بیشتر به محیط‌های متاثر از گرمای پلوم‌های گوشته‌ای شباهت دارد. علاوه بر دمای بالا، محتوای بالای NiO که میزان آن تا 0.487% هم رسیده، قابل توجه است. مقادیر ملاحظه‌شده بیشتر از مقادیر گزارش‌شده از بازالت‌های MORB بوده (Wilson, 1989) و از مقادیر عنوان‌شده درباره کماتیت‌های جزیره گورگونا (Revillon, 2000) نیز بالاتر است.



شکل ۱۷- الگوهای عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی غنی از منیزیم شامل میمکیت‌ها، کیمبرلیت‌ها، بونینیت‌ها و کماتیت‌ها، الگوها از (Arndt, 2003)

در شکل ۱۹ مقدار MgO مذاب را بین ۰.۳ تا ۲۳.۷۴٪ برآورد شده است. مقادیر پایین MgO محاسبه‌شده، به درشت بلوری مربوط می‌شود که در نمونه پیکریتی F37 ملاحظه شده است و مقادیر پایین Fo در این درشت‌بلور غیرعادی به‌نظر می‌رسد، چراکه میزان Fo حتی در ریزبلورهای زمینه همین سنگ بالاتر بوده است. بنابراین با توجه به وجود شبکه‌ای از



شکل ۱۸- نحوه تغییرات برخی از اکسیدهای عناصر اصلی و فرعی در برابر تغییرات عدد منیزیم در بلورهای الیون

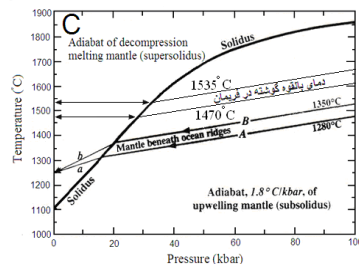
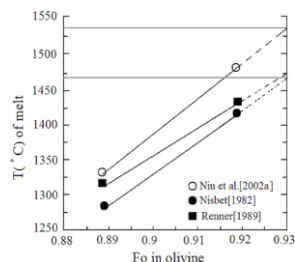
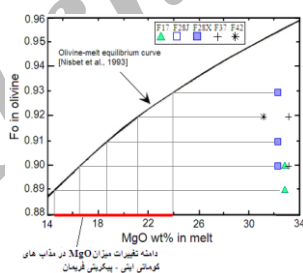
و نامتحرک، نحوه پراکندگی نمونه‌ها در نمودارهای عدد منیزیم و زیرکنیم در برابر دیگر عناصر و به‌ویژه الگوهای متفاوت عناصر خاکی کمیاب و عنکبوتی مجموعه سنگ‌های فرامافیک-مافیک فریمان را به‌رغم ارتباط

#### ۷- بحث

با توجه به شواهد ژئوشیمیایی مانند نسبت‌های مختلف عناصر ناسازگار

البون آشکار است را نمی‌توان براساس سازوکارهایی که در مناطق فرورانش منجر به تشکیل مذاب‌های غنی از MgO بونینیتی می‌شود، توجیه کرد، زیرا تقریباً هیچ یک از علائم ژئوشیمیایی ویژه مذاب‌های تشکیل شده در این مناطق مانند تهی‌شدگی از عناصر HFS مانند نیوبیم، تانتال و تیتانیوم و غنی‌شدگی از عناصر LIL مانند توریم و باریوم را در نمونه‌های مورد مطالعه، نمی‌توان دید. افزون بر این، ویژگی‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های فریمان، به ویژه الگوهای عنکبوتی و REE به مورب عادی شباهت نداشته و تنها الگوی نمونه‌های مافیک متعلق به دسته پیکریتی - تولییتی را می‌توان با مورب غنی‌شده قابل مقایسه دانست و چنانکه می‌دانیم در مورد مذاب‌های مورب غنی‌شده نیز معمولاً از دخالت و نقش پلوم‌های گوشته‌ای در محل پشته اقیانوسی صحبت می‌شود. مقدار گرمای برآوردشده با استفاده از ترکیب البونین‌ها نیز بالاتر از حدی است که از محیط‌های فرورانش و یا مورب عادی انتظار می‌رود و بیشتر به دمای حاکم بر جایگاه‌های متأثر از دمای بالای پلوم‌های گوشته‌ای شباهت دارد. آخرین دلیل ما در ارتباط با نقش پلوم گوشته‌ای در سنگ‌زایی سنگ‌های فرامافیک - مافیک فریمان به سنگ‌نگاری نمونه‌های مورد مطالعه و مشاهده انواع بافت‌های نامتعادل مربوط می‌شود، چنانکه پیش‌تر عنوان شد، براساس مطالعات تجربی چنین بافت‌های نامتعادلی را می‌توان از طریق فروتافت مذاب‌های فراتافت‌شده شبیه‌سازی کرد. در پایان این بخش باید تاکید کرد که تفاوت‌های ژئوشیمیایی ملاحظه‌شده بین سه دسته تعریف‌شده به گونه‌ای است که براساس فرایندهای AFC قابل توجیه نیست و از ناهمگنی منبع گوشته‌ای نمونه‌های مورد مطالعه حکایت دارد و چنانکه می‌دانیم برخلاف ماهیت همگن منبع گوشته‌ای مورب، سنگ‌شناسان به ناهمگنی پلوم‌های گوشته‌ای از جنبه ترکیبی اعتقاد دارند.

نزدیک فضایی و زمانی و تعلق به یک سری آتشفشانی - رسوبی واحد نمی‌توان در چارچوب یک سری ماگمایی واحد با ارتباط مبتنی بر تفریق بلورین کانی‌ها دسته‌بندی کرد. با توجه به الگوهای مختلف عنکبوتی و عناصر خاکی کمیاب، دخالت سه منبع گوشته‌ای با ویژگی‌های متفاوت را در پیدایش مذاب‌ها می‌توان محتمل دانست. به این ترتیب، بجز سه نمونه F57, F55, F89، دیگر نمونه‌های مورد مطالعه را در دو دسته به ترتیب با ژئوشیمی مانند سری‌های کماتیتی و پیکریتی - تولییتی می‌توان قرار داد و سه نمونه یادشده را که ژئوشیمی کاملاً متفاوتی با دو دسته دیگر دارند را به عنوان دسته سوم در نظر گرفت. پیدایش مذاب‌های مافیک در هر یک از دسته‌های کماتیتی و پیکریتی - تولییتی را می‌توان براساس درجات پایین‌تر ذوب‌بخشی منابع گوشته‌ای واحد و یا تبلور تفریقی البونین از مذاب والد توضیح داد. سه نمونه دسته سوم برخی از ویژگی‌های بونینیت‌ها را نشان می‌دهند، اما در مقایسه با بونینیت‌ها از سیلیس فقیرتر بوده و الگوی عنکبوتی متفاوتی دارند، بنابراین می‌توان پیدایش آنها را همانند نحوه تشکیل مذاب‌های بونینیتی، حاصل آمیختگی یک منبع گوشته‌ای تهی‌شده با ترکیبات غنی از برخی از عناصر ناسازگار دانست، اما برخلاف مذاب‌های بونینیتی که در نتیجه افزوده‌شدن سیالات غنی از LREE وابسته به آگیری قطعه فرورنده تکون یافته‌اند، این نمونه‌ها احتمالاً محصول انجماد مذاب‌هایی هستند که از ذوب‌بخشی یک منبع تهی‌شده کم‌عمق که توسط ترکیبات وابسته به پلوم گوشته‌ای، از برخی عناصر ناسازگار به‌ویژه Nb غنی‌شده، نشأت گرفته است. نقش پلوم گوشته‌ای در پیدایش مذاب‌های کماتیتی و پیکریتی فریمان را می‌توان با توجه به نسبت‌های عناصر ناسازگار و نامتحرک شامل Zr/Y, Nb/Y, Nb/Th, Zr/Nb و موقعیت نمونه‌ها در نمودارهای مربوطه استنباط نمود افزون بر اینکه میزان بالای MgO در مذاب‌های فریمان را که با توجه به مقادیر بالا Fo بلورهای



شکل ۱۹ - A: تعیین مقدار MgO مذاب، B: تعیین دمای مذاب، C: برآورد دمای بالقوه منبع گوشته‌ای مذاب‌های فریمان

- واحدهای فرامافیک - مافیک شرق خطواره فریمان با توجه به فابریک‌های ملاحظه‌شده دارای منشأ آتشفشانی بوده و در تناوب با واحدهای رسوبی، یک توالی رسوبی - آتشفشانی عادی مربوط به پرمین را تشکیل

## ۸ - نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بحث حاضر را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد.

**Berberian, M., King, G. C. P., 1981,** "Towardsna palaeogeography and tectonic evolution of Iran" *Can. J. Earth Sci.*, 18, P.210- 265.

**Bozorgnia, F., 1973,** "Paleozoic foraminiferal biostratigraphy of central and east Elbruz mountains", *Iran National Iranian oil company, geological laboratories, publ. No. 4, Tehran, P.45-87.*

**Briand, B., Bouchardon, J. L., Capiez, P., Pibboule, M., 2002,** "Felsic (A-type) -basic (plumeinduced) Early Palaeozoic bimodal magmatism in the Maures Massif (southeastern France)", *Geol. Mag.* 139(3), P.291-311.

**Condie, K. C., 2005,** "High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes?", *Lithos*, 79, P.491-504.

**Condie, K. C., 2003,** "Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems, an electronic journal of the Earth Sciences, Volume 4, Number 1, P.1525-2027.*

**Diefenbach, K. W., Davoudzadeh, M., Alavi Tehrani, N., and Lensch, G., 1986,** "Paleozoic ophiolites in Iran and geodynamic implication", *Ofioliti*, 11(3), P.305-338.

**Fang, N., Niu, Y., 2003,** "Late palaeozoic ultramafic lavas in Yunnan, SW China, and their geodynamic significance", *journal of the Earth Sciences, Volume 6, Number 1, P. 25-27.*

**Fitton, J. G., Saunders, A. D., Larsen, L. M., Hardarson, B. S., Norry, M. J., 1998,** "Volcanic rocks from the Southeast Greenland margin at 63° N: Composition, petrogenesis, and mantle sources", *Proceedings of the ocean drilling program, scientific results, vol. 152, P.331-350.*

**Hanski, E., Huhma, H., Rastas, P. and Kamenetsky, V. S., 2001,** "The Palaeoproterozoic Komatiite Picrite association of Finnish Lapland", *Journal of Petrology, Vol. 42, Number 5, P.855-876.*

**Irvine, T.N. & Baragar, W.R.A. 1971,** "A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks", *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, P.523-548

**Jensen, L. S., & Pyke, D. R., 1982,** "In: Arndt, N. T., Nisbet, E.G., (ed.) Komatiites: George Allen & Unwin", P. 147-157.

**Kerrick, R., D. Wyman, P. Hollings, and A. Polat, 1999b,** "Variability of Nb/U and Th/La in 3.0 to 2.7 Ga Superior Province ocean plateau basalts: Implications for the timing of continental growth and lithosphere recycling, Earth Planet", *Sci. Lett.*, 168, P.101-115.

**Kozur, H., Mostler, H. Ruttner, A. W., 1991,** "Pelagic Permian Conodonts from an oceanic sequence at Sang-e-Sefid (Farman, NE - Iran)", *Abh Geol B-A 38: P.101- 110.*

**Lebas, M. J., 2000,** "IUGS Reclassification of high-Mg and picritic volcanic rocks", *Journal of petrology, Volume 41, Number 10, P.467-1470.*

**Lofgren, G. E., 1983,** "Effect of heterogeneous nucleation on basaltic textures: A dynamic crystallization study", *Journal of Petrology, Vol. 24, part 3, P.229-255.*

**Magidi, B., 1983,** "The geochemistry of ultrabasic lava flow occurrence in Northeast Iran.G.S.I. Report", No. 51, P.463-477.

**Magidi, B., 1981,** "The ultrabasic lava flows of Mashhad, NE Iran: Geological magazine", V 118, P.49-58.

**Magidi, B., 1979,** "The ultrabasic lava flow of Mashhad north-east Iran, Ofioliti", V.4, No.2, P.211.

**Magidi, B., 1978,** "Petrostructure aldela region de Mashhad These", *Universite grenoble, France, P.377.*

می‌دهند.

- با توجه به نسبت‌های ملاحظه‌شده عناصر ناسازگار و نامتحرک که نسبت به آلودگی حساس هستند، می‌توان نتیجه گرفت که بجز سه نمونه TF89, F57, F55 دیگر نمونه‌ها در معرض آلودگی با ترکیبات پوسته‌ای قرار نگرفته‌اند و یا در صورت آرایش میزان آن در حدی نبوده که علائم ژئوشیمیایی اصلی را در مذاب‌ها دستخوش تغییرات جدی کند. بنابراین ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های مورد مطالعه شامل نمونه‌های پیکریتی و کماتیتی، نشان‌دهنده مشخصه‌های ژئوشیمیایی منبع گوشته‌ای آنان خواهد بود.

- تفاوت‌های مشخص ملاحظه‌شده در نسبت‌های بین عناصر ناسازگار و نامتحرک مجموعه نمونه‌های مورد مطالعه، از عدم تعلق سنگ‌ها به یک سری واحد حکایت داشته و نقش منابع گوشته‌ای مختلف، شرایط و سازوکارهای متفاوت ذوب‌بخشی را در زمینه تشکیل انواع مذاب‌ها مطرح می‌سازد.

- ملاحظه روابط سیستماتیک بین میزان عناصر ناسازگار نامتحرک مانند الگوهای صاف و موازی در نمودارهای تغییر عناصر خاکی کمیاب و عنکبوتی حاکی از آن است که فرایندهای دگرسانی و دگرگونی مقادیر و نسبت‌های اولیه عناصر یادشده را در هر دسته از سنگ‌ها تحت تأثیر قرار نداده است. عناصر با پتانسیل یونی پایین یا LILE مانند Rb, Cs, Sr, Ba را باید از این قاعده مستثنی دانست.

- براساس علائم ژئوشیمیایی ملاحظه‌شده، نمونه‌های فریمان به بازالت‌های تولییتی نوع عادی مورب و یا بازالت‌های تولییتی تشکیل شده در حوضه‌های حاشیه‌ای کماتی که تصور می‌رود در فرایند فراراندگی و اضافه شدن پوسته اقیانوسی به حاشیه قاره‌ای و تشکیل مجموعه‌های افیولیتی شرکت دارند، شباهت نداشته و بنابراین با توجه به ویژگی‌های ژئوشیمیایی، شرایط تشکیل این سنگ‌ها را از جنبه ژئودینامیکی بیشتر می‌توان به رویداد آتشفشانی نقطه‌ای مانند آنچه در محل نقاط داغ و تحت تأثیر دمای بالای پلوم‌های گوشته‌ای روی می‌دهد، مرتبط دانست تا وقایع آتشفشانی که در محل بازشدگی‌های اقیانوسی در پشته‌ها و یا در حوضه‌های حاشیه‌ای روی می‌دهد.

## مراجع

سبزه‌یی، م.، پورلطیفی، ع.، ۱۳۷۴، "ماگمای افیولیتی و نقش آن در تکوین افیولیت‌های ایران، برداشت‌هایی از گدازه‌های الترابازیک با گرایش کماتیتی" چهاردهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۲۰ صفحه.

**Alavi, S. M., 1991,** "Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in north eastern Iran", *Geol. Soc. Amer., Bull.*, V.103, P.983-992.

**Alavi, S. M., 1979,** "The Virani ophiolite complex and surrounding rocks" *Geologisch Rundschau*, V. 68, no. 1, P. 334-341.

**Arndt, N. T., 2003,** "Komatiites, kimberlites, and boninites", *Journal of geophysical research, Vol. 108, No. B6, P.2293.*

**Arndt, N.T., 1994,** "Komatiites In: Condie, k.c., (ed.) Archean Crustal Evolution", *Amsterdam: Elsevier, P.11- 44.*

- Sun, S. S., & Nesbitt, R. W., 1978a, "Petrogenesis of Archaean ultrabasic and basic volcanics: evidence from the rare earth elements", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 65, P.301-325.
- Vernon, R. H., 2004, "A practical guide to rock microstructure", *Cambridge University Press*, P.30-32.
- Viruete, E. J., Estau'n, A. P., Contreras, F., Joubert, M., Weis, D., Ullrich, T. D., Spadea, P., 2007, "Plume mantle source heterogeneity through time: Insights from the Duarte Complex, Hispaniola, northeastern Caribbean", *Journal of Geophysical research*, Vol. 112, P.1-19.
- Wilson, M., 1989, "Igneous petrogenesis, Unwin Hyman London", *Journal of Petrology*, vol. 44, Number 1, P.141-157.
- Nisbet, E. G., Cheadle, M. J., Arndt, N. T. and Bikle, M. J., 1993, "Constraining the potential temperature of the mantle: A review of the evidence from komatiites", *Lithos*, 30, P.291-307.
- Révilion, S., Arndt, N. T., Chauvel, C., and Hallot, E., 2000, "Geochemical study of ultramafic volcanic and plutonic rocks from Gorgona island, Colombia: the plumbing system of an oceanic plateau", *Journal of Petrology*, Vol. 41 Number 7, P.1127-1153.
- Stocklin, J., 1977, "Structural correlation of the alpine ranges between Iran and central Asia, Memoir Hors Service Society Geologique France", P.333-353.
- Stocklin, J., 1968, "Structural history and tectonics of Iran: a review", *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52, P.1229-1258.

Archive of SID

