

# بررسی سنگ‌زایی سنگ‌های فرامافیک - مافیک خاور فریمان، شمال خاوری ایران

نوشته: غلامعلی معاف پوریان<sup>\*</sup>، محمد پورمعافی<sup>\*</sup>، منصور وثوقی عابدینی<sup>\*</sup>، محمد هاشم امامی<sup>\*\*</sup>، محمدرضا جان‌نثاری<sup>\*\*</sup> و استغافن پارمن<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی، تهران، ایران

<sup>\*\*</sup>سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

<sup>\*\*\*</sup>دپارتمان زمین‌شناسی، دانشگاه دورهام، دورهام، انگلستان

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶ / ۰۶ / ۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷ / ۰۴ / ۰۸

## چکیده

رخنمون‌های پراکنده متشکل از سنگ‌های فرامافیک- مافیک و میان لایه‌های رسوبی در شمال خط‌واره فریمان - تربت جام را به طور عمده در مناطق باختر مشهد، خاور فریمان و شمال تربت جام در منطقه آق دربند می‌توان ملاحظه کرد. مطالعه این سنگ‌ها در خاور فریمان، شواهد صحرایی، مانند وجود سیماهای بالشی و برشی را ارائه کرد که از ماهیت آتشفشانی تا کم‌ژرفای این سنگ‌ها حکایت دارد، ضمن آن که مشاهده انواع بافت‌های نامتعادل شامل اولیوین‌ها و پیروکسن‌های کشیده و توخالی، به صورت بافت پیروکسن اسپینفکس و بافت اولیوین میکرو اسپینفکس، به ترتیب در سنگ‌های مافیک و فرامافیک و همچنین حضور شیشه بر همین اساس توضیح داده می‌شود. بنابراین ماهیت آتشفشانی تا کم‌ژرفای این سنگ‌ها آشکار بوده و با توجه به معیارهای زمین‌شیمیایی تعریف شده توسط IUGS در خصوص انواع سنگ‌های آتشفشانی غنی از MgO نمونه‌های فرامافیک- مافیک خاور فریمان را می‌توان به ترتیب در ردیف سنگ‌های کم‌تیتی، پیکریتی و بازالتی قرار داد. تفاوت‌های اساسی دیده شده در زمینه زمین‌شیمی این سنگ‌ها مانند نسبت‌های مختلف بین عناصر ناسازگار نامتحرک و الگوهای متفاوت تغییرات REE و عنکبوتی را نمی‌توان صرفاً بر اساس اختلاف در شرایط و درجه ذوب بخشی یک منبع گوشته‌ای یکنواخت و یا فرایندهای AFC توضیح داد. بنابراین وجود یک منبع گوشته‌ای ناهمگن و یا سازوکار ذوب دینامیک را در این زمینه می‌توان محتمل دانست. علاوه بر ناهمگنی ذکر شده که با انگاره منبع پلوم گوشته‌ای قابل توجه است، نسبت‌های عناصر ناسازگار نامتحرک مانند  $(Nb/Th)_N$  در برابر  $(Nb/La)_N$  و  $Nb/Th$  در برابر  $Zr/Y$  را که به نسبت‌های دیده شده در بازالت‌های مربوط به جایگاه دشت‌های اقیانوسی (OPB) شباهت دارد و همچنین موقعیت نمونه‌ها در نمودار نسبت  $Zr/Y$  برابر  $Nb/Y$  که بالاتر از خط  $\Delta Nb$  قرار می‌گیرند را بر همین اساس یعنی نقش پلوم گوشته‌ای در سنگ‌زایی سنگ‌ها می‌توان توضیح داد. در اینجا، پیدایش بافت‌های نامتعادل نیز به فروتافت (Undercooling) ماگماهای فراتافته نشأت گرفته از پلوم گوشته‌ای در حال صعود و نیز رشد سریع بلورها نسبت داده می‌شود. این استدلال با داده‌های موجود در خصوص شیمی بلورهای اولیوین مبنی بر میزان بالای Fo که تا حداکثر 0.93 در یک نمونه کم‌تیتی بالغ می‌شود و از وجود مذاب‌های والد دما بالا و سرشار از MgO حکایت داشته، مطابقت می‌کند. بر این اساس، مقدار MgO ماگمای والد در حدود ۲۳/۷۴٪ و دمای آن بین  $1470 \text{ C}^\circ$  تا  $1535 \text{ C}^\circ$  برآورد می‌شود. مقادیر ذکر شده فراتر از حدی است که از یک محیط وابسته به فروانش و یا حتی مورب عادی انتظار می‌رود و بیشتر با دمای حاکم بر محیط‌های مرتبط با نقاط داغ و متأثر از پلوم‌های گوشته‌ای شباهت دارد.

**کلید واژه‌ها:** فرامافیک - مافیک، کم‌تیت، بافت نامتعادل، بافت اسپینفکس.

## ۱. مقدمه

اساس داده‌های عناصر اصلی و فرعی صورت پذیرفته و معدود داده‌های موجود در خصوص عناصر کمیاب که در قالب چند پایان‌نامه تهیه شده نیز چندان قابل اعتماد نیستند و در حقیقت می‌توان دریافت که زمین‌شیمی و سنگ‌زایی مجموعه سنگ‌های فرامافیک - مافیک خاور خط‌واره فریمان - تربت جام به‌رغم اهمیت فوق‌العاده آنها، کماکان ناشناخته مانده است. به این ترتیب داده‌های ارائه شده در مقاله حاضر را شاید بتوان اولین گزارشی به شمار آورد که در آن به بررسی سنگ‌زایی این سنگ‌ها بر اساس مجموعه‌ای از داده‌ها، شامل طیف کامل عناصر کمیاب و شیمی بلورهای اولیوین در نمونه‌های فرامافیک پرداخته شده است. داده‌های تهیه شده حاصل تجزیه ۱۵ نمونه از سنگ‌های فرامافیک - مافیک خاور فریمان است که با روش‌های مطمئن تهیه شده است.

## ۲. زمین‌شناسی منطقه و مشاهدات صحرایی

منطقه مورد مطالعه بخشی از زون بینالود به شمار می‌آید (نبوی، ۱۳۵۵) و برونزدهای توالی مورد مطالعه اغلب در مجاورت گسل‌هایی که در راستای شمال باختری - جنوب خاوری قرار دارند، دیده می‌شود. سنگ‌های فرامافیک - مافیک در تناوب با لایه‌های رسوبی آواری و آهکی، به صورت رخنمون‌های پراکنده در مناطق شمالی و خاوری فریمان دیده می‌شوند و در حقیقت بخشی از مجموعه رخنمون‌های پراکنده متشکل از توالی واحدهای فرامافیک - مافیک و لایه‌های رسوبی شمال خط‌واره

از نظر بیشتر نویسندگان سنگ‌های فرامافیک- مافیک و میان‌لایه‌های رسوبی خاور فریمان هم‌ارز با رخنمون‌هایی هستند که در باختر مشهد، در امتداد خط‌واره تربت جام- فریمان دیده می‌شود (مانند Magidi, 1983, 1981 و افتخار نژاد و بهروزی، ۱۳۷۰). بنابراین نظرها و تفسیرهای ژئودینامیکی مطرح شده در خصوص توالی یاد شده را که اغلب بر اساس مطالعه رخنمون‌های باختر مشهد ارائه شده می‌توان در مورد توالی‌های خاور فریمان نیز تعمیم داد. در این زمینه می‌توان به دیدگاه‌های (Berberian (1981), Stocklin (1977, 1968), Alavi (1991, 1979), Diefenbach et al. (1986), Stocklin & Nabavi (1973) پور لطیفی و همکاران (۲۰۰۱)، طاهری و قائمی (۱۹۹۴) اشاره کرد که مجموعه سنگ‌های مورد بحث را در ردیف سنگ‌های افیولیتی قرار داده و آنها را به عنوان آثار زمین درز دیرینه تیتس معرفی می‌کنند. از سوی دیگر Magidi (1983, 1981) نظر متفاوتی مطرح ساخته و سری سنگی یاد شده را به عنوان یک توالی آتشفشانی- رسوبی عادی شامل گدازه‌های فرامافیک - مافیک مغاکی (آبیسال) تولیدت غنی از MgO با گرایش کم‌تیتی معرفی کرده‌اند. Sabzehei (1996) نیز نظر مشابهی را مطرح کرده و مجموعه سنگ‌های فرامافیک - مافیک باختر مشهد را در زمره سنگ‌های سری کم‌تیتی قرار می‌دهد. بنابراین می‌توان به‌نوبت یک توافق عمومی در رابطه با ماهیت واقعی سنگ‌های مورد بحث اشاره کرد و جالب آن که به‌رغم شمار زیاد مطالعات انجام شده در خصوص این سنگ‌ها، بررسی‌های زمین‌شیمیایی انجام شده تنها بر

بلاتک و طیفی از استانداردهای مختلف با ترکیب‌های گرانیتی تا پریدوتیتی تعیین شده است. داده‌های مربوط به شیمی بلورهای اولیون (جدول ۴ و ۵) در دانشگاه ادینبورگ و با استفاده از دستگاه الکترون‌میکروپروب مدل CAMECA SX100 تهیه شده است. همه تجزیه‌ها در شرایط شعاع الکترونی 1KV، ولتاژ متناوب، جریان 20 nA و اندازه نقاط 1um انجام شده است. خطوط اولیه پرتو X با استفاده از ترکیب فلزهای خالص، اکسیدهای ساختگی و کانی‌های طبیعی با ترکیب شناخته شده، کالبره و ترکیب کانی‌های نامشخص با استفاده از روش تصحیح PAP matrix تعیین شده و اکسیژن در تمام تجزیه‌ها، توجه به روابط استوکیومتری مشخص شده است.

#### ۴. سنگ‌نگاری

در بررسی میکروسکوپی سنگ‌های مافییک و فرامافییک، می‌توان تنوع بافتی قابل ملاحظه‌ای را مشاهده کرد که از تاریخچه متفاوت سرد شدن آنها حکایت دارد. در ادامه بحث، ابتدا به تشریح مشخصه‌های بافت میکروسکوپی نمونه‌های مافییک و فرامافییک و تفسیر این ویژگی‌ها پرداخته و سپس زمین‌شیمی این سنگ‌ها را بررسی خواهیم کرد.

#### ۴-۱. سنگ‌های فرامافییک

در کیلومتر ۱۵ مسیر سفید سنگ - شاهان گرماب واقع در خاور فریمان رخنمونی از یک جریان گدازه فرامافییک به نسبت سبتر را می‌توان دید که با توجه به تفاوت‌های مشاهده شده در زمینه بافت، میزان نسبی کانی‌ها و ترکیب دارای ساختار لایه‌ای بوده و به عنوان یک جریان گدازه کماتیتی لایه لایه معرفی شده است (معاف پوریان و همکاران، ۱۳۸۶). ویژگی‌های سنگ‌نگاری بخش‌های مختلف این جریان به قرار زیر است.

#### — روانه کماتیتی لایه‌ای

این روانه شامل سه بخش است که به ترتیب از بخش بالایی آن به طرف پایین عبارتند از بخش خرد شده، بخش اولیون میکرواسپینفکس و بخش انباشتی. بخش خرد شده دارای رنگ بسیار تیره، بافت نادیدا و فاقد درشت‌بلور (Aphyric) است. فابریک خرد شده گدازه به صورت شکستگی و یا ترک‌های چند ضلعی بسیار ظریف کم و بیش بر سطح سنگ قابل مشاهده است (شکل ۳A) و به خوبی با توصیف مطرح شده از بخش برشی جریان‌های کماتیتی مطابقت دارد (مانند Arndt et al., 1977). در این بخش از گدازه اولیون، کلینوپیروکسن، کانه‌های کدر و شیشه اجزای تشکیل دهنده سنگ به‌شمار می‌روند (شکل ۳B، نمونه F28J). اولیون به صورت بلورهای هم بعد شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و یک پارچه (Solid) با ابعاد متفاوت مشاهده می‌شود به گونه‌ای که تبلور دو نسل از این کانی را به ترتیب در شرایط عمقی، تحت فروتافت (Undercooling) آهسته‌تر و شرایط سطحی همراه با دیگر اجزای زمینه سنگ می‌توان مطرح کرد، اندازه اغلب بلورهای اولیون مربوط به نسل اول ۰/۴mm - ۰/۲mm است در حالی که اندازه بلورهای تشکیل شده در آخرین مرحله اغلب کوچک‌تر از ۰/۰۸mm است. وجود مقدار به نسبت بالای بلورهای اولیون هم بعد و شکل‌دار حاکی از آن است که صعود ماگما تا پیش از رسیدن به سطح زمین همراه با وقفه در ترازهایی از پوسته بوده است و ماگمایی که به سطح رسیده مملو از درشت‌بلورهای اولیون بوده و ظاهراً به دلیل فراهم نشدن شرایط خاصی که به تهی شدن مذاب از درشت‌بلور منجر می‌شود بافت شاخص اولیون اسپینفکس در مقیاس ماکروسکوپی تشکیل نشده و تنها تبلور آخرین نسل از بلورهای اولیون، به صورت دانه‌های بسیار کوچک هم بعد همراه با دیگر اجزا زمینه سنگ دیده می‌شود. بلورهای اولیون به طور کامل به سرپانتین تبدیل شده‌اند و این ویژگی همراه با

فریمان - تربت جام به شمار می‌آیند. توالی مورد مطالعه علاوه بر خاور فریمان به طور عمده در نواحی باختر مشهد و شمال تربت جام در منطقه آق دربند نیز مشاهده می‌شود. در ناحیه خاور فریمان رخنمون‌های یاد شده را بویژه در مناطق شمالی و شمال خاور سفید سنگ می‌توان مشاهده کرد. در این نواحی، با توجه به عملکرد گسل‌های متعدد رخنمون‌های توالی مورد مطالعه را اغلب در همبندی‌های گسلی با سازندهای جوان‌تر می‌توان مشاهده کرد که کار مطالعات صحرایی این سنگ‌ها را تا حدودی دشوار می‌سازد (شکل ۱). سن توالی مورد بحث بر اساس مطالعات انجام شده بر روی میکرو فسیل‌های یک نمونه آهکی توسط Asselian, Bozorgnia (1973) تا Sakmarian تعیین شده است. علاوه بر این Kozur & Mostler (1991) بر اساس کنودونت‌های مشاهده شده در یک نمونه چرت سرخ رنگ زمان تشکیل این سنگ‌ها را به بخش بالایی پرمین زیرین نسبت داده‌اند. در توالی مورد مطالعه در لایه‌های رسوبی با ترکیب پلیتی، توسعه برگ‌وارگی در حد رخ اسلیتی به موازات لایه‌بندی دیده می‌شود که با چیرگی میدان تنشی که در آن  $\sigma_1$  در جهت قائم بوده، مطابقت دارد. پیدایش چنین میدان تنشی را بر اساس استقرار توام با اعمال فشار توده گرانیتویدی که پروتوده‌های آن در امتداد خط واره تربت جام - فریمان به فراوانی مشاهده می‌شود بهتر می‌توان توجه 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 برگ‌وارگی به موازات سطح محوری چین‌ها توسعه یافته باشد. بر اساس مشخصه‌های ظاهری مانند رنگ، بافت و نوع رخنمون به سادگی می‌توان سنگ‌های مافییک و فرامافییک را روی زمین از یکدیگر تشخیص داد. نمونه‌های مافییک اغلب دارای رنگ تیره متمایل به سبز و یا سبز بوده بافت نادیدا (آفاتیتیک) تا ریزدانه دارند ضمن آن که تنها در یک مورد که به نمونه دایک مافییک مربوط می‌شود، بافت پیروکسن اسپینفکس مشاهده شد (شکل ۵). این سنگ‌ها اغلب به صورت سیل‌هایی با ستبرای متفاوت ۲ تا ۲۰ متر، در مواردی به صورت گدازه و به‌ندرت به صورت دایک مشاهده می‌شوند. نمونه‌های فرامافییک دارای رنگ تیره متمایل به خاکستری و بافت نادیدا بوده و اغلب به صورت روانه‌های گدازه با سیماهای برشی، بالشی تا توده‌ای مشاهده می‌شوند (شکل ۲B).

#### ۳. نمونه برداری و روش‌های تجزیه

در شکل ۱ محل برداشت نمونه‌ها مشخص شده است و چنان که مشاهده می‌شود بجز نمونه‌های F104 و F89, F57, F55, F1, F97 دیگر نمونه‌ها، از گسترده‌ترین رخنمون واحدهای سنگی مورد بحث که در فاصله ۱۵ کیلومتری از مسیر سفید سنگ به شاهان گرماب واقع گردیده، تهیه شده است. آماده سازی نمونه‌ها و تهیه پودر نمونه‌ها با استفاده از هاون‌های آگات در دانشگاه دورهام در انگلستان انجام شد. داده‌های عناصر اصلی، فرعی و عناصر جزئی Zr, Ct, Sc و به روش XRF و با استفاده از طیف سنج مدل PW2404 در دانشگاه ادینبورگ تهیه شده است. جزئیات روش شامل نحوه تهیه دیسک‌های شیشه‌ای و قرص‌های پودر فشرده که به ترتیب برای تجزیه عناصر اصلی و جزئی مورد استفاده قرار گرفتند در Fitton et al. (1998) ارائه شده و در این جا تنها به درج مقادیر  $\sigma$  و rmsd در جدول ۱ اکتفا می‌شود، معیارهای ذکر شده به ترتیب میزان دقت و صحت داده‌های مورد استفاده را بازتاب می‌کند. داده‌های مربوط به سایر عناصر جزئی (جدول ۲) در دانشگاه دورهام و با استفاده از روش ICP - MS تهیه شده است. مقادیر S.D (انحراف معیار) و R.S.D (انحراف معیار نسبی) داده‌ها که به ترتیب معیارهای کیفی دقت و صحت داده‌ها به‌شمار می‌آیند، بر اساس نتایج حاصل از تجزیه نمونه‌های تکراری، نمونه‌های

ترکیبی که ممکن است از تبلور تفریقی اولیون از مذاب‌های فرامافیک والد، درجات پایین تر ذوب بخشی و یا به‌طور کلی شرایط متفاوت ذوب بخشی بویژه ذوب در فشار کمتر نتیجه شده باشد. در سنگ‌های مافیک مجموعه پارائز کانی شاخص دگرگونی در رخساره شایست سبز شامل کلریت - اکتینولیت - اپیدوت (Winkler, 1974)، ترجمه هوشمندزاده، (۱۳۷۱) مشاهده می‌شود و از آنجا که رخساره ذکر شده مطابق با تقسیمات ارائه شده توسط (Winkler (1974)، در خصوص میدان دما-فشار دگرگونی، هم ارز با دگرگونی درجه پایین است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که توالی مورد مطالعه نیز در معرض دگرگونی در همین حد قرار گرفته و به این ترتیب می‌توان تا حد زیادی از عدم تحرک و توزیع دوباره عناصر مورد استفاده در مطالعات سنگ‌زایی تحت عنوان عناصر ناسازگار و غیر متحرک اطمینان حاصل کرد. در این بخش، به اختصار به توصیف ویژگی‌های سنگ‌نگاری واحدهای مافیک خواهیم پرداخت.

#### – دایک مافیک

شکل ۵A نمونه متعلق به دایکی را نشان می‌دهد که در گدازه‌های فرامافیک خرد شده، استقرار یافته است. ستبرای این دایک در حدود ۵m بوده و در بخش‌های داخلی آن، بافت شاخص پیروکسن اسپینفکس به‌خوبی توسعه یافته است. کانی‌شناسی سنگ شامل کلینوپیروکسن‌های کشیده‌ای است که در مواردی طول آنها بیشتر از ۵cm بوده و در مقاطع عرضی ساختار تو خالی آنها به خوبی مشخص است (شکل ۵B)، پلاژیوکلازهای تیغه‌ای و اسکلتی، تیتانومگنتیت، اسفن و شیشه کلریتی شده از دیگر اجزای سنگ به‌شمار می‌روند. در بخش‌های حاشیه‌ای این دایک بافت سنگ در نمونه‌دستی نادیدنا بوده و در زیر میکروسکوپ بافت نامتعادل شامل کلینوپیروکسن‌های اسکلتی و شاخه‌ای مشاهده می‌شود.

#### – سیل‌ها

در نمونه دستی سیل‌های ستبر انواع بافت‌های یکنواخت نادیدنا (در حواشی سیل) تا ریز بلور مانند آنچه در سنگ‌های میکروگابرویی و دلریتی عادی موجود است، دیده می‌شود و تنها با مطالعه میکروسکوپی این سنگ‌ها می‌توان به وجود کلینوپیروکسن‌های تو خالی پی برد، با این وجود، بافت چیره در بیشتر نمونه‌ها ریزدانه تا ساب‌افیتییک بوده و شامل هم رشدی پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن است که در بخش‌های میانی سیل‌های ستبر به صورت بافت افیتییک تا ساب‌افیتییک مشاهده می‌شود اما در سیل‌های نازک هم‌رشدی پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن به صورت میکروسکوپی بوده و چنان که (Lofgren (1983 عنوان داشته، به احتمال از دشواری هسته‌بندی پلاژیوکلاز در مقایسه با پیروکسن حکایت دارد که به رغم دمای تبلور بالاتر بعد از پیروکسن متبلور می‌شود.

#### – گدازه‌ها

رخنمون گدازه‌های مافیک محدود بوده و این سنگ‌ها با توجه به دانه‌بندی بسیار ریز و بافت نادیدنا اغلب رنگ تیره دارند. کانی‌شناسی این سنگ‌ها، مانند سیل‌ها بوده و تنها از نظر ویژگی‌های بافتی با آنها تفاوت دارند، برخلاف سیل‌ها، در گدازه‌ها کلینوپیروکسن‌های دارای اشکال نامتعادل شاخه‌ای بوده و پلاژیوکلازهای سوزنی و اسکلتی را که گاهی دارای بافت واربولیتییک هستند، در هم‌رشدی با کلینوپیروکسن می‌توان مشاهده کرد (شکل ۵C).

### ۵. چگونگی تشکیل و اهمیت بافت‌های نامتعادل

در گدازه‌های فرامافیک منطقه مورد بحث بافت‌های شاخص اولیون اسپینفکس مشاهده نمی‌شود. در این مورد باید توجه کرد که بر اساس گزارش‌های متعدد، در بخش عمده برنزدهای کماتیتی آرکن نیز این سنگ‌ها فاقد بخش اسپینفکس بوده و اغلب دارای بافت انباشتی هستند (مانند Hill et al., 1994, 2004) و چنان که

فابریک خرد شده سنگ را می‌توان نشانگر فوران گدازه فرامافیک در محیط زیرآبی دانست. بافت نامتعادل کلینوپیروکسن‌ها نیز از درجات بالای فروتافت و رشد سریع بلورها در شرایط سطحی حکایت داشته و کاملاً به نمونه‌های گزارش شده توسط Fleet (1975) از نمونه کماتیتی دارای بافت اسپینفکس شباهت دارند.

در شکل ۳C تصویر میکروسکوپی نمونه F29C را که درست در زیر بخش خرد شده روانه کماتیتی قرار داشته و به بخش اولیون میکرو اسپینفکس روانه تعلق دارد، دیده می‌شود رنگ سنگ تیره و بافت آن با وجود دانه‌های کشیده اولیون و پیروکسن با ابعاد ۱۲-۲mm در یک زمینه ریز بلور، پورفیری است. در بررسی میکروسکوپی سنگ با توجه به وجود اولیون‌های (اکون سر پانتین) کشیده و تو خالی (Hopper) که دارای جهت بافتگی ترجیحی هستند می‌توان بافت آن را اولیون میکرو اسپینفکس دانست. کلینوپیروکسن‌ها را هم به صورت درشت‌بلورهای کشیده و تو خالی و هم به صورت دسته‌های شعاعی متشکل از تارهای کشیده و نازک که شکل Spray نامیده شده به صورت آمیخته با مواد شیشه‌ای قهوه‌ای رنگ در زمینه سنگ و در فضای بین دانه‌های کشیده اولیون می‌توان مشاهده کرد (شکل ۳C). در شکل ۳D تصویر میکروسکوپی نمونه F17، که به بخش انباشتی روانه کماتیتی تعلق دارد، دیده می‌شود. بافت سنگ در این بخش از نوع ارتوکومولا (Orthocumulate) بوده و کانی‌های شامل اولیون‌های هم بعد و ناهم بعد، شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار یک پارچه و تو خالی با ابعاد بین ۰/۳ تا حداکثر ۳mm (اندازه اغلب بلورها کوچک‌تر از ۰/۶mm است)، کلینوپیروکسن‌های کشیده و تو خالی با ابعاد حداکثر ۱/۲mm است، شیشه قهوه‌ای که تا حدودی کلریتی شده و کانه‌های کدر از دیگر اجزای سنگ به‌شمار می‌روند. بافت این سنگ ارتوکومولا بوده و تازه بودن بخش عمده بلورهای اولیون از جمله ویژگی‌های آن به‌شمار می‌رود.

#### – روانه پیکریتی

در نقطه شماره ۲ (شکل ۱) روانه‌های پیکریتی را با فابریک‌های برشی، بالشی (شکل ۲B) تا توده‌ای می‌توان مشاهده کرد. رخنمون‌های پیکریتی را نیز بر اساس مشخصه‌های فابریکی و بافتی همچون روانه کماتیتی که شرح آن رفت، می‌توان به سه بخش با فابریک‌های برشی، بالشی و توده‌ای تقسیم کرد اما در هیچیک از بخش‌های روانه پیکریتی نمی‌توان بافت اولیون میکرو اسپینفکس نظیر نمونه کماتیتی F29C را مشاهده کرد. با این وجود، در نمونه‌های متعلق به بخش‌های برشی و بالشی گدازه‌های پیکریتی انواع جالبی از بافت‌های نامتعادل شامل بلورهای اولیون هم بعد، شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و در عین حال تو خالی و مملو از میانبار مذاب (Melt inclusion)، پیروکسن‌های کشیده و تو خالی و تار مانند با آرایش شعاعی، اسپینل‌های متقاطع و مواد شیشه‌ای تبلور یافته به کلریت را می‌توان مشاهده کرد (شکل ۴). نمونه‌های متعلق به بخش انباشتی گدازه‌های پیکریتی، بافت ارتوکومولا دارند.

### ۴-۲. سنگ‌های مافیک

سنگ‌های مافیک بیشتر به صورت سیل، در چند مورد به صورت جریان‌های گدازه با گسترش محدود و ستبرای کمتر از ۱۰ متر و در یک مورد به صورت دایک با ستبرای نزدیک به ۵ متر مشاهده می‌شود. در سنگ‌های مافیک پلاژیوکلاز به صورت گسترده حضور داشته و بر حسب درجه فرو تافت به شکل‌های متعادل لوحه‌ای و تیغه‌ای یک پارچه (Solid) و یا شکل‌های نامتعادل اسکلتی و سوزنی مشاهده می‌شود. فراوانی پلاژیوکلاز و اسفن در سنگ‌های مافیک و نبود این کانی‌ها در نمونه‌های فرامافیک از جمله وجوه تمایز کانی‌شناسی این سنگ‌ها به‌شمار رفته، از میزان بالاتر سازنده‌های  $\text{CaO}$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{SiO}_2$  و  $\text{TiO}_2$  در مذاب‌های مافیک حکایت دارد، تفاوت

سوزنی، اسفرولیتی و دندریتی مشاهده می‌شوند در شرایطی که نسبت یاد شده پایین بوده تشکیل می‌شوند. فروتافت ماگما که به ایجاد وضعیت ابرسیر شدگی ماگما از بلورها و در نهایت رشد سریع آنها منجر می‌شود از جمله عواملی است که پایین بودن نسبت D/G و توسعه شکل‌های نامتعادل بلوری را سبب می‌شود. بنابراین، مشاهده دامنه وسیعی از بافت‌های نامتعادل در نمونه‌های فرامافییک و مافییک فریمان را می‌توان است نشانگر فروتافت مذاب‌های مربوطه و دماهای بالاتر از حد عادی این مذاب‌ها به سبب فراتافتگی (Superheating) آنها دانست که در نهایت، در شرایط سطحی و در نتیجه رویداد فروتافت مؤثر به توسعه بافت‌های ذکر شده منجر شده است. اکنون در مورد چگونگی تشکیل اولیون‌های صفحه‌ای و اسکلتی در کماتیت‌های شاخص آرکن نیز به رشد سریع بلورها، تهی بودن مذاب از اجزای جامد و امکان پذیر بودن هسته‌بندی همگن و بخصوص تعداد کم هسته‌ها، گرانروی بسیار پایین و شیمی خاص این ماگماها به عنوان عوامل اصلی (مانند Lofgren, 1983 و Arndt, 1986) اشاره می‌شود. به نظر Faure et al. (2006) درجات بالا فروتافت و هسته‌بندی همگن در مذاب عاری از درشت بلور عامل اصلی تشکیل بافت اسپینفکس به شمار می‌آید.

## ۶. نام‌گذاری سنگ‌ها

برای نام‌گذاری سنگ‌ها از جدیدترین نمودارهای ارائه شده توسط IUGS برای دسته‌بندی سنگ‌های آتشفشانی غنی از MgO استفاده شده است (شکل‌های ۶، ۷ و ۸ LeBas, 2000). برخی از نویسندگان مانند Kerr & Arndt (2001) استفاده از این نمودارها را به دلیل عدم توجه به بافت سنگ‌ها و بویژه بافت شاخص اسپینفکس در سنگ‌های کماتیتی تأیید نکرده و نشان می‌دهند که چگونه تعدادی از نمونه‌های شاخص کماتیت‌های آرکن با بافت اولیون اسپینفکس، در این نمودارها در محدوده سنگ‌های پیکریتی واقع شده‌اند. با این وجود LeBas (2000) پاسخ به انتقادهای مطرح شده به لزوم استفاده از معیارهای زمین‌شیمیایی در زمینه دسته‌بندی سنگ‌های آتشفشانی که به دلیل وجود شیشه و اندازه ریز بلورها مطالعه آنها به روش مودال امکان پذیر نبوده، تأکید می‌کند و عقیده دارد بافت سنگ و ویژگی است که صرفاً تاریخچه سرد شدن مذاب را بازتاب می‌کند و آنچه اهمیت دارد، داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ است که اطلاعات مفیدی را در خصوص منبع گوشته‌ای ماگما فراهم می‌سازد. همان‌گونه که در شکل ۶ دیده می‌شود به استثنای چهار نمونه F104, F36, F29D, F29 که در محدوده سنگ‌های بازالتی واقع شده‌اند، یازده نمونه در قلمرو سنگ‌های پیکریتی قرار گرفته‌اند که با در نظر گرفتن میزان مجموع قلبایی‌ها هشت نمونه F97, F89, F42, F37, F29C, F28X, F28J, F17 را می‌توان با توجه به میزان  $TiO_2 < 1\%$  به عنوان نمونه‌های کماتیت و نمونه F1 را پیکروبازالت معرفی کرد. نام‌گذاری نمونه‌های F97, F57, F55 تا حدودی با ابهام همراه است زیرا این سه نمونه با توجه به مقدار مجموع قلبایی‌ها در ردیف سنگ‌های پیکریتی قرار می‌گیرند اما از آنجا که در صد وزنی  $SiO_2$  در این نمونه‌ها بیشتر از 45٪ وزنی است با توجه به نمودار مجموع قلبایی‌ها در برابر MgO (شکل ۷) آنها را نمی‌توان در ردیف سنگ‌های پیکریتی - پیکروبازالتی یا کماتیتی قرار داد و شاید این سنگ‌ها را بتوان به عنوان کماتیت بازالتی در نظر گرفت، موقعیت این نمونه‌ها در نمودار Jensen & Pyke (1982) (شکل ۱۰A) این احتمال را تأیید می‌کند. با توجه به نمودار مجموع قلبایی‌ها در برابر سیلیس (شکل ۸A، Irvine & Baragar, 1971) از چهار نمونه مافییک سه نمونه F104, F29D, F29 به عنوان بازالت نیمه قلبایی و نمونه F36 به عنوان بازالت قلبایی معرفی می‌شود اما همین نمونه در نمودار Nb/Y در برابر  $Zr/TiO_2$  (Pearce, 1996) به عنوان بازالت شناخته می‌شود و تنها نمونه F1، بازالت قلبایی نام گذاری شده است. با توجه به نام‌تحرک بودن عناصر به کار رفته در نسبت‌های مورد

Arndt (1986) اظهار داشته در ناحیه Munro Township کانادا نیز که از جمله مناطق شاخص کماتیت‌های آرکن به‌شمار می‌رود، بخش عمده رخنمون‌ها فاقد بافت اسپینفکس بوده و اغلب فابریک توده‌ای و بافت انباشتی دارند و حتی در بخش‌هایی از جریان هم که این بافت مشاهده شده با پیشروی در امتداد مسیر حرکت جریان به دلیل تغییر شرایط فیزیکی ماگما، برای مثال کاهش دما و افزایش گرانروی آن، بخش اسپینفکس روانه به تدریج نازک شده و سرانجام به فابریک توده‌ای منتهی می‌شود لذا Arndt (1986) در توضیح چگونگی پیدایش فابریک لایه‌ای و به‌طور مشخص، نحوه تشکیل بخش اسپینفکس جریان، بر لزوم فراهم آمدن یک شرایط خاص تأکید نموده و عقیده دارد که ماگما باید هنگام خروج یا کمی پس از آن به طریقی از درشت بلور تهی شده باشد، برای مثال، در نتیجه جمع شدن ماگما در یک فرورفتگی توپوگرافی و تفریق سریع گرانشی درشت بلورهای اولیون که در مذاب کماتیتی با توجه به چگالی بالا و گرانروی بسیار کم آن امکان پذیر بوده است. در مذاب تهی شده از اجزای جامد هسته‌بندی همگن و تشکیل اولیون‌های صفحه‌ای و اسکلتی امکان پذیر می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نبود نمونه‌های شاخص اولیون اسپینفکس در گدازه‌های فرامافییک خاور فریمان ممکن است تا حد زیادی به دلیل فراوانی درشت بلورهای اولیون در مذابی که به سطح رسیده باشد. بافت مشاهده شده در اغلب نمونه‌های برشی و بالشی، شامل درشت بلورهای هم بعد شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار که از تبلور این کانی در عمق حکایت دارد (شکل ۳B) تأییدی بر این مدعاست. در این مورد، می‌توان احتمال داد که به دلیل حرکت مذاب چگال فرامافییک از بین سنگ کره قاره‌ای سبتر و کم چگال، بویژه در بخش پوسته‌ای آن، صعود ماگما با وقفه‌هایی همراه بوده که طی آن بخشی از اولیون‌های مشاهده شده در نمونه‌های فرامافییک، بویژه درشت بلورهای درشت‌تر که در مواردی یاد آور بافت به هم پیوسته (Glomerate) می‌باشند، تبلور یافته که بنا به دلایلی مانند توقف کوتاه ماگما، جریان‌های همرفتی قوی و یا محتوای بالا Fo که فقدان اختلاف چگالی لازم برای تفریق گرانشی را سبب شده از مذاب تفکیک نگردیده و همراه با آن به سطوح بالاتر و در نهایت به سطح زمین رسیده‌اند. با این وجود، می‌توان مطمئن بود که بخشی از بلورهای اولیون که شکل متفاوتی دارند، شامل بلورهای ریزتر، درشت بلورهای توخالی و بلورهای کشیده توخالی و نوک تیز در یک شرایط متفاوت که درجه فروتافت بالاتر بوده، در سطوح بالاتر که بلور دارای آهنگ رشد سریع‌تری نیز بوده است، تبلور یافته‌اند (شکل‌های ۳، ۴ و ۵) و در آخرین مرحله از انجماد ماگما که به احتمال در شرایط سطحی صورت پذیرفته تبلور مذاب بین دانه‌ای به تشکیل آمیزه‌های متشکل از مواد شیشه‌ای و تارهای نازک و شعاعی پیروکسن منجر شده، این مرحله در یک فاصله زمانی کوتاه نسبت به مرحله پیشین خود صورت پذیرفته، زیرا شواهد دال بر درجات بالاتر فروتافت را در مذاب‌های حبس شده در درون اولیون‌های توخالی نیز به صورت آمیزه‌های شیشه و پیروکسن‌های دارای اشکال نامتعادل می‌توان مشاهده کرد. با توجه به تبلور کلینوپيروکسن از مذاب‌های حبس شده در درشت بلورهای اولیون می‌توان نتیجه گرفت که تحول شیمی مذاب در این مرحله، یعنی زمان به سطح رسیدن آن به گونه‌ای بوده که تنها تبلور پیروکسن را امکان‌پذیر می‌ساخته و ما تبلور این کانی در اشکال نامتعادل و در فضای بین درشت بلورهای اولیون و کلینوپيروکسن‌های تبلور یافته در مراحل قبلی به صورت دسته تارهای نازک شعاعی و آمیخته با مواد شیشه‌ای دیده می‌شود (شکل ۳).

در مورد ریخت‌شناسی بلورها می‌توان به نظر Vernon (2004) نیز استناد کرد، وی بر این باور است که بلورهای هم بعد، خود شکل و یک پارچه، نمایانگر اشکال متعادلی هستند که در نسبت‌های بالا D/G (نسبت روند یا آهنگ انتشار به روند رشد) متبلور می‌شوند و اشکال نامتعادل بلورها که به طور معمول به صورت‌های اسکلتی،

در شکل A ۱۱ پراکندگی نمونه‌های فرامافیک- مافیک فریمان در نمودار تغییرات  $Al_2O_3/TiO_2$  در برابر  $CaO/Al_2O_3$  مشاهده می‌شود. پراکندگی نمونه‌ها در این نمودار به گونه‌ای است که دخالت دست کم سه نوع مذاب مختلف را با ویژگی‌های سنگ‌زایی متفاوت در تشکیل این سنگ‌ها ضروری ساخته و تفکیک نمونه‌ها را به سه دسته مجزا با نسبت‌های متفاوت  $Al_2O_3/TiO_2$  می‌توان مشاهده کرد. از آنجا که نسبت  $CaO/Al_2O_3$  به میزان نسبی کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در سنگ بستگی دارد افزایش آن را می‌توان به انباشت بلورهای کلینوپیروکسن و کاهش آن را به تمرکز پلاژیوکلاز در مذاب مرتبط دانست، به این ترتیب تغییرات نسبت  $CaO/Al_2O_3$  را که در این نمودار با خطوط ممتد قائم نشان داده شده و در نسبت‌های ثابت  $Al_2O_3/TiO_2$  صورت پذیرفته می‌توان به درصد نسبی این کانی‌ها در سنگ‌ها مرتبط دانست اما مقادیر مختلف این کانی‌ها هم‌گرچه ممکن است از فرایندهای انباشت و یا تفریق بلورها تأثیر پذیرفته باشد اما در اصل به میزان نسبی  $Al_2O_3$  و  $CaO$  مذاب که خود تابعی از شرایط ذوب و ویژگی‌های منبع بوده، بستگی داشته است. برخی از نویسندگان (Wilson et al., 2003) نسبت‌های بالا  $Al_2O_3/TiO_2$  را از جمله مشخصه‌های منابع تهنی شده به شمار آورده‌اند، لذا دسته‌بندی نمایان شده در این نمودار، با فرض وجود منابع گوشته‌ای با ویژگی‌های متفاوت سازگاری دارد. بالاترین نسبت‌ها در سه نمونه F89, F57, F55 مشاهده می‌شود. در شکل ۱۱B نیز می‌توان نسبت‌های تقریباً ثابت  $Al_2O_3/TiO_2$  و نسبت‌های متغیر  $CaO/TiO_2$  را در دو دسته از سنگ‌ها شامل دسته غنی از تیتان و دسته با محتوای متوسط تیتان مشاهده کرد. این روند را از جنبه زمین‌شیمیایی بر اساس افزایش نسبی درجه ذوب بخشی می‌توان توجیه کرد اما از آنجا که افزایش درجه ذوب بخشی منجر به افزایش نسبت  $Al_2O_3/TiO_2$  نشده است، لذا می‌توان احتمال داد که ذوب در شرایطی که کانی آلومینیم‌دار گوشته یعنی گارنت پایدار بوده صورت پذیرفته و بدین ترتیب ورود Al به فاز مذاب با همان سهولت و میزانی که Ca وارد شده امکان پذیر نبوده است. ذوب در ژرفای زیاد و فشار بالا و شرایط نزدیک به خشک از جمله عوامل اصلی پایداری گارنت در پریدوتیت گوشته‌ای به شمار می‌آیند. در همین نمودار، با توجه به موقعیت متمایز سه نمونه F89, F57, F55 که نسبت‌های بسیار بالای  $CaO/TiO_2$  و  $Al_2O_3/TiO_2$  دارند، می‌توان احتمال وجود یک منبع گوشته‌ای تهنی شده از تیتان را در زمینه تشکیل این سنگ‌ها مطرح کرد. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، موقعیت نمونه‌های فریمان را به ترتیب در نمودارهای  $Al_2O_3/TiO_2$  در برابر  $CaO/Al_2O_3$  و  $Al_2O_3/TiO_2$  در برابر  $(Gd/Yb)_N$  در مقایسه با دیگر سنگ‌های آتشفشانی غنی از MgO که توسط Arndt (2003) گردآوری شده دیده می‌شود. در شکل ۱۲ همه نمونه‌های فریمان به استثنای نمونه F1 در بین دیگر مجموعه‌های کماتیتی واقع شده‌اند. موقعیت سه نمونه F89, F57, F55 که پیش از این سیمای تهنی شده از تیتان آنها را در نمودار شکل ۱۱B 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 ۱۳ در محدوده مذاب‌های منشأ گرفته از منابع تهنی شده این نتیجه‌گیری را تأیید می‌کند، زیرا اغلب سنگ‌شناسان بر این باورند که بخش تهنی شده گوشته در سطوح بالایی آن قرار دارد. موقعیت دیگر نمونه‌ها در همین شکل، نشانگر وجود منبع گوشته‌ای گارنت‌دار است و با توجه به نحوه پراکندگی نمونه‌های F36, F29D, F1, F42, F37 در گرایش آنها به سمت سنگ‌های میرمیکتی می‌توان تصور کرد که نمونه‌های غنی از تیتان، بویژه نمونه F1 نمایانگر مذاب‌های بخشی درجه پایین است که در فشارهای بالاتر در مقایسه با نمونه‌های کماتیتی تشکیل شده‌اند. به نظر Herzberg (1995) فشارهای بالاتر موجب پایداری گارنت نسبت به اولیون و کلینوپیروکسن می‌شود که نتیجه آن تشکیل کماتیت‌هایی

استفاده در این نمودار و بویژه با توجه به آن که نسبت Nb/Y به عنوان شاخص کلیایی شناخته شده، لذا افزایش مجموع کلیایی‌ها در نمونه F36 که با توجه به جدول ۱ بیشتر به سبب میزان بالا سدیم بوده است را نه به عنوان یک ویژگی آذرین اولیه به احتمال باید نتیجه تأثیر نوعی دگرسانی مانند اسپیلیتی شدن بازالت‌ها توسط آب دریا تفسیر نمود. نمونه‌های نیمه کلیایی در نمودار AFM (شکل ۸B) در محدوده بازالت‌های تولیتی واقع شده‌اند. در اینجا متذکر می‌شود که با توجه به آن که نمودارهای شکل ۸ صرفاً برای تقسیم‌بندی بازالت‌ها ارائه شده لذا از نمایش موقعیت نمونه‌های فرامافیک در این نمودارها خودداری شده است.

در شکل ۱۰A موقعیت نمونه‌های فریمان را در نمودار Jensen & Pyke (1982) که برای نام‌گذاری سنگ‌های آتشفشانی غنی از MgO ارائه شده مشاهده می‌شود. نمونه‌های فریمان در این نمودار با عنوان کماتیتی، بازالت کماتیتی، تولیت غنی از MgO و تولیت غنی از آهن نام‌گذاری می‌شوند. با توجه به آثار ترکیبی ناشی از انباشت بلورهای اولیون در مذاب، Hanski et al. (2001) برای دسته‌بندی و نام‌گذاری سنگ‌های آتشفشانی غنی از MgO از نسبت‌های مولی آلومین ( $Al_2O_3$ ) و تیتان ( $TiO_2$ ) از میزان واحد استفاده می‌شود. معیارهای دسته‌بندی در این نمودار (شکل ۱۰B) با استفاده از معادلات ویژه به گونه‌ای محاسبه می‌شوند تا موقعیت هر نمونه در این نمودار نمایانگر تصویر ترکیب سنگ از قطب اولیون باشد تا به این ترتیب از ورای تأثیر انباشت بلورهای اولیون ترکیب نمونه‌ها بررسی و با یکدیگر مقایسه شود. معادلات مورد استفاده به قرار زیر است:

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

در نمودار مورد بحث برخی از سنگ‌های فرامافیک- مافیک فریمان شامل نمونه‌های F42, F37, F36, F29D, F1 در ردیف سنگ‌های پیکریتی قرار گرفته و شماری از آنها نیز با عنوان کماتیت‌های غنی شده از تیتانیم رده‌بندی می‌شوند (نمونه‌های F89, F57, F55, F104, F97, F29C, F29, F28X, F28J نیز که در مرز بین محدوده‌های تعیین شده جهت کماتیت‌های تهنی نشده از آلومینیم و یونینت‌ها قرار دارند، تا حدودی بحث‌انگیز بوده و در بخش زمین‌شیمی سنگ‌های بیشتر به این مسئله خواهیم پرداخت.

## ۷. زمین‌شیمی

پیش از پرداختن به بحث زمین‌شیمی نمونه‌های مورد مطالعه، بررسی احتمال آرایش ماگما این امکان را فراهم خواهد ساخت تا با دقت بیشتری در مورد ویژگی‌های منابع گوشته‌ای مذاب قضاوت کنیم. به نظر Kerrich et al. (1999b) آن دسته از بازالت‌های آرکن ایالت سوپریور که توسط پوسته آلوده شده‌اند، به‌طور شاخص از نسبت‌های  $(La/Sm)_N > 1.5$  و  $Th/Ce > 0.05$  برخوردار بوده‌اند (نسبت  $La/Sm$  بر حسب مقادیر گوشته اولیه Sun & McDonough, 1989 بهنجار شده). (Condie 2003) در بررسی نسبت‌های عناصر ناسازگار در بازالت‌های اقیانوسی و کماتیت‌ها به منظور تفکیک نمونه‌های آلوده از نسبت  $Nb/Th < 5$  به عنوان معیار آلودگی پوسته‌ای قابل توجه و بیشتر از ۵٪ استفاده می‌کند. با در نظر گرفتن نسبت‌های یاد شده و مقایسه آنها با مقادیر دیده شده در نمونه‌های فریمان (جدول ۳) می‌توان دریافت که بر اساس نسبت‌های  $(La/Sm)_N$  تنها نمونه‌های F89, F57, F55 و با توجه به نسبت‌های  $Th/Ce$  این سه نمونه و نمونه F1 را می‌توان به عنوان نمونه‌های آلوده در نظر گرفت اما بر پایه دیگر معیار آلودگی یعنی نسبت‌های  $Nb/Th < 5$  هیچ یک از نمونه‌ها را نمی‌توان در ردیف نمونه‌های آلوده قرار داد، با این وجود بر اساس این معیار نیز سه نمونه F89, F57, F55 با توجه به برخوردار بودن از پایین‌ترین نسبت‌های بیش از دیگر نمونه‌ها مشکوک به آلودگی هستند. بدین ترتیب بر اساس معیارهای ذکر شده می‌توان از عدم آلودگی بقیه نمونه‌ها، دست کم آلودگی به میزان قابل توجه، اطمینان حاصل کرد.

مقاطع نمونه‌های F1 و F36 نوعی سازوکار ذوب بخشی نیز در این زمینه مؤثر بوده است. به عبارت دیگر فرایند ذوب بخشی به احتمال از نوع دینامیک بوده است. دسته دوم از نمونه‌های مورد مطالعه شامل نمونه‌های فرامافییک F17, F28X, F29C و نمونه‌های مافییک F29, F97 بوده که الگوی Hump شکل با بخش میانی برآمده را که اغلب در کماتیت‌ها مشاهده می‌شود (مانند Hanski et al., 2001) نشان می‌دهند (شکل ۱۵B) ضمن آن که نمونه F104 را هم که از یک الگوی تقریباً صاف برخوردار است با توجه به شباهت کلی با الگوی نمونه F29 می‌توان در همین دسته قرار داد و یا به عنوان یک نمونه بازالتی با الگوی تا حدودی متفاوت از نمونه‌ها کماتیتی و بازالت کماتیتی در نظر گرفت.

دسته سوم شامل نمونه‌های مافییک F55, F57 و نمونه فرامافییک F89 است که دارای الگوی U شکل با بخش میانی فرو رفته الگوی شاخص سنگ‌های بونینیتی هستند (شکل ۱۵C). برای مقایسه، در شکل ۱۵D الگوهای مختلف مشاهده شده در کنار یکدیگر نمایش داده شده‌اند. نمونه‌های F55, F57, F89 با الگوی REE بونینیتی، بالاترین نسبت‌های  $Al_2O_3/TiO_2$  و پایین‌ترین مقادیر  $TiO_2$  را داشته و از این نظر به بونینیت‌ها شباهت دارند، ضمن آن که با توجه به موقعیت آنها در نمودار نسبت  $Al_2O_3/TiO_2$  برابر نسبت  $CaO/Al_2O_3$  (شکل‌های ۱۱A و ۱۲) منشأ آنها را باید در ژرفای کم و از یک منبع تهی شده جستجو کرد که با استدلال‌های مطرح شده در خصوص چگونگی ایجاد الگوی U شکل REE مطابقت می‌کند زیرا به عقیده برخی از نویسندگان مانند Cameron et al. (1983) الگوی یاد شده در نتیجه دخالت و آمیختگی یک ترکیب غنی از LREE با منبع تهی شده نظیر مورب پدید آمده است (شکل ۱۶). منبع غنی از LREE در مناطق فرورانش سیالات مشتق شده از قطعه فرورانده است که دگرنهادی منبع گوشته‌ای تهی شده را سبب می‌شوند و یا ممکن است ترکیبات پوسته‌ای باشند که آلیاژ مذب را موجب می‌شوند، در هر صورت، شکل الگوی REE حاصل شده، تلفیقی از شکل‌های الگوی مورب و الگوی غنی از LREE خواهد بود که به صورت U شکل مشاهده می‌شود. با این وجود در مقایسه با بونینت‌ها، این سه نمونه از سیلیس فقیرتر بوده و در عین حال از تیتانیم و نیویم غنی‌ترند و در نمودار عنکبوتی (شکل ۱۷C) فاقد نشیب‌های معروف Nb و Ta، هستند حتی همان‌گونه که در نمودارهای عنکبوتی مشاهده می‌شود، از Nb غنی شده‌اند. در شکل‌های ۱۷ الگوهای عنکبوتی نمونه‌های فریمان که بر حسب مقادیر گوشته اولیه (Sun & McDonough, 1989) به‌نچار شده‌اند دیده می‌شود. در این شکل نیز با تفکیک نمونه‌ها به سه دسته با الگوهای موازی سعی شده است بر سیمای سنگ‌زادی مهم دیده شده در این نمودارها تأکید شود. سیمای مشترک در کلیه الگوها شامل بی‌هنجاری‌های وابسته به تحرک عناصر LILE و تهی‌شدگی همه نمونه‌ها به استثنای نمونه F1 از P و K است، ضمن آن که وجود فرازهای غیر عادی پتاسیم که تنها در سه نمونه دیده می‌شود، به احتمال تحت تأثیر سیالاتی که دگرسانی سنگ‌ها را سبب شده‌اند به وجود آمده است.

Campbell et al. (1994) براین باورند که در صورت نبود نشیب‌های Nb, Ti بی‌هنجاری‌های منفی P را نمی‌توان ناشی از آلودگی پوسته‌ای و یا دگرنهادی آبدار منبع گوشته‌ای مذب دانست. ایشان با اشاره به قابلیت جان‌شینی P به جای Si در شماری از کانی‌های سیلیکاتی گوشته اظهار می‌دارند که، تنها گارنت قادر است میزان قابل ملاحظه‌ای از P را در خود نگه داشته و بی‌هنجاری منفی در حد مشاهده شده از این عنصر را سبب شود. الگوهای موازی و صاف هر دسته که در بخش عناصر نامتحرک مشاهده می‌شود از وجود منابع گوشته‌ای مشترک در زمینه تشکیل مذب‌های فرامافییک و مافییک حکایت دارد. برای مثال الگوهای رسم شده برای نمونه‌های پیکریتی - تولیتی در شکل ۱۷A صرفنظر از عناصر متحرک، کاملاً

است با محتوای  $Al_2O_3$  پایین‌تر و نسبت‌های  $CaO/Al_2O_3$  و  $Gd/Yb$  بالاتر است. در نمودار نسبت Nb/Th در برابر Zr/Nb (شکل ۱۴A) هم بجز چهار نمونه F89, F57, F55, F1 نمونه‌های دیگر در محدوده بازالت‌های دشت میان اقیانوسی قرار می‌گیرند که به‌نظر سنگ‌شناسان در نتیجه فعالیت پلوم‌های گوشته‌ای تشکیل شده‌اند. با ارائه این نمودار (Condie 2005) سعی داشت بر تفسیرهایی تأکید کند که در پیدایش مذاب‌های بازالتی، دخالت و نقش منابع گوشته‌ای مختلف را که از ویژگی‌های زمین‌شیمیایی متنوع برخوردار هستند، مطرح می‌سازند. در این نمودار نمونه‌های کماتیتی و پیکریتی - تولیتی در فاصله بین ترکیب‌های گوشته اولیه و گوشته تهی شده عمیق قرار دارند و ظاهراً از دو منبع گوشته‌ای با باروری متفاوت منشأ گرفته‌اند. به این ترتیب، با توجه عدم حساسیت نسبت Nb/Th به درجه ذوب بخشی 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 منبع گوشته‌ای نمونه‌های پیکریتی - تولیتی در مقایسه با منبع نمونه‌های کماتیتی تا حدودی غنی‌تر بوده است اما به احتمال مذاب‌های کماتیتی محصول درجات بالاتر ذوب بخشی بوده‌اند، ضمن آن که با توجه به مقادیر تقریباً مشابه نسبت Zr/Nb در چهار نمونه مافییک F104, F97, F29D, F36 و نمونه‌های فرامافییک F37, F42 که اجتماع واحدی را تشکیل می‌دهند و با توجه به حساس بودن نسبت یاد شده به درجه ذوب بخشی، می‌توان نتیجه گرفت که درجات مختلف ذوب بخشی را نمی‌توان عامل اصلی تغییرات در نمونه‌های مافییک و فرامافییک ذکر شده به شمار آورد. موقعیت چهار نمونه F89, F57, F55, F1 در مجاورت منابع بازچرخه از وجود یک منبع گوشته‌ای متفاوت در مقایسه با منابع گوشته‌ای مذاب‌های کماتیتی، پیکریتی و تولیتی حکایت دارد. منبع گوشته‌ای اخیر از نیویم 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 بر اساس وجود منبع گوشته‌ای ناهمگن از جنبه ترکیبی بهتر می‌توان توجیه کرد. بسیاری از نویسندگان پلوم‌های گوشته‌ای را که با توجه به ساختار ویژه خود شامل سه بخش سر (Head) بخش محوری میانی یا دنباله (Tail) و مواد گوشته‌ای اطراف که به درون پلوم کشیده شده می‌باشند، به عنوان منبع ناهمگن مذاب‌های کماتیتی و پیکریتی معرفی کرده‌اند (مانند Kerr et al., 1996; Viruete et al., 2007) موقعیت نمونه‌های فریمان در نمودار نسبت Zr/Y در برابر Nb/Y (شکل ۱۴B) که بالاتر و یا بر روی خط اختلاف نیویم ( $\Delta Nb$ ) قرار دارند، می‌توان منشأ گرفتن مذاب‌های مربوطه را از منبع پلوم گوشته‌ای محتمل دانست، به نظر Fitton et al. (1997) مذاب‌هایی که ترکیب آنها بالاتر و یا بر روی خط  $\Delta Nb$  قرار می‌گیرد از منبع پلوم گوشته‌ای منشأ گرفته‌اند و به نظر Condie (2005) بازالت‌هایی که در زیر خط  $\Delta Nb$  قرار می‌گیرند یا از یک منبع گوشته‌ای تهی شده کم‌ژرفا (DM) سرچشمه گرفته یا به مناطق فرورانش مربوط بوده و یا نمایانگر آن دسته از بازالت‌های منشأ گرفته از پلوم هستند که توسط پوسته قاره‌ای و/یا سنگ کره زیر قاره ای آلوده شده‌اند.

در شکل‌های ۱۵ الگوهای REE نمونه‌های فریمان که بر حسب مقادیر کندریتی به‌نچار شده‌اند دیده می‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر، نمونه‌ها را با توجه به شکل الگوها در چهار دسته با الگوهای موازی قرار داده و نمودارهای هر دسته به صورت مجزا رسم شده‌اند. دسته اول نمونه‌های مافییک F1, F29D, F36 و نمونه‌های فرامافییک F37, F42 را شامل می‌شود که از الگوی نظیر سنگ‌های پیکریتی - تولیتی یا بازالت‌های مورب غنی شده (شکل ۱۵A) برخوردار است. الگوهای موازی در این دسته از وجود یک منبع یکسان حکایت دارد، اما سطح بالاتر الگوی نمونه‌های مافییک و بویژه نمونه F1 بیش از مقداری است که تنها بر اساس تبلور تفریقی و یا کاهش درجه ذوب بخشی قابل توجیه باشد. لذا به‌نظر می‌رسد که با توجه به الگوی

از بالاترین میزان Fo برای برآورد ترکیب مذاب والد و مقدار MgO آن استفاده کرد. در شکل ۱۹A بر اساس میزان Fo در بلورهای اولیون و با استفاده از معادله  $MgO = 55 * Fo^{1.5}$  (Nisbet et al., 1993) مقدار MgO مذاب در تعادل با این بلورها برآورد شده است. مقدار MgO مذاب بر این اساس، بین ۸/۰۳ تا ۲۳/۷۴ برآورد می‌شود. مقادیر پایین MgO محاسبه شده به میزان پایین Fo در درشت بلوری مربوط می‌شود که در نمونه پیکریتی F37 دیده شده است که غیر عادی به نظر می‌رسد، زیرا میزان Fo حتی در ریز بلورهای زمینه همین سنگ بالاتر بوده است. بنابراین، با توجه به وجود شبکه‌ای از شکستگی‌ها در بلور مورد بحث و با توجه به مقادیر یکسان از بخش هسته تا حاشیه بلور یاد شده، می‌توان نتیجه گرفت که پایین بودن عدد منیزیم در این بلور، به احتمال حاصل تحول بلور برای برقراری تعادل دوباره ترکیبی با زمینه بوده که در نتیجه تبادلات یونی در خلال دگرگونی صورت پذیرفته است. در شکل ۱۹B با استفاده از بالاترین میزان Fo در بلورهای اولیون، میزان دمای مذاب در تعادل با بلور را بر اساس سه مدل مختلف بین حداقل  $1470^{\circ}C$  بر اساس مدل (Nisbet (1982) و حداکثر  $1535^{\circ}C$  بر اساس مدل (Niu et al. (2002a) برآورد شده است. به طور کلی دماهای برآورد شده فراتر از حدی است که از یک محیط فرورانش و یا MORB عادی می‌توان انتظار داشت و بیشتر به محیط‌های متأثر از گرمای پلوم‌های گوشته‌ای شباهت دارد (Fang Niu, 2003). علاوه بر دمای بالا، محتوای بالای NiO که میزان آن تا ۰/۴۸۷ هم افزوده شده قابل توجه است. مقادیر دیده شده بیشتر از مقادیر گزارش شده از بازالت‌های MORB بوده (Wilson, 1989) و از مقادیر عنوان شده برای کماثیت‌های جزیره گورگونا (Reysson et al., 2000) هم بالاتر است.

## ۹. بحث و نتیجه‌گیری

به‌طور کلی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های مورد مطالعه با مذاب‌هایی تشکیل شده در بالای زون فرورانش در شرایط آب‌دار تفاوت دارد برای مثال تپی شدگی از HFSE و غنی شدگی از LILE در نمونه‌های فریمان دیده نمی‌شود. علاوه بر این، با نگاهی به برخی از نسبت‌های بین عناصر ناسازگار که از جنبه سنگ‌زایی دارای اهمیت است (جدول ۳) می‌توان دریافت که مجموعه سنگ‌های فرامافیک-مافیک خاور فریمان را نمی‌توان متعلق به یک سری ماگمایی واحد دانست و ارتباط آنها با یکدیگر را بر اساس یک روند تفریقی ساده توضیح داد. به همین ترتیب ویژگی‌های زمین‌شیمیایی این سنگ‌ها به گونه‌ای است که نمی‌توان آنها را مشابه بازالت‌های مورب عادی و یا بازالت‌های تشکیل شده در حوضه‌های حاشیه‌ای دانست که تصور می‌رود بخش‌هایی از آنها در خلال همگرایی صفحات و فرورانش به حاشیه قاره‌ای می‌پیوندند. تفاوت‌های مشاهده شده در نسبت‌های مهمی مانند  $[La/Sm]_N$  و  $[Th/Sm]_N$  که در نمونه‌های کماثیت کوچک‌تر از ۱ و در نمونه‌های پیکریتی بزرگ‌تر یا در حدود ۱ است، به ترتیب از منابع گوشته‌ای تپی شده و غنی شده این سنگ‌ها حکایت دارد. بر اساس تفاوت‌های مشاهده شده در دیگر نسبت‌های مهم مانند  $La/Nb$ ،  $Nb/Th$  و  $[Zr/Nb]_N$  نیز همین نتیجه را می‌توان گرفت ضمن آن که بررسی نسبت‌های مورد بحث در سه نمونه بحث انگیز و برخوردار از الگوهای U شکل REE (نمونه‌های F89, F57, F55) از غنی شدگی ترجیحی آنها از برخی عناصر بسیار ناسازگار مانند Nb, Ta, Th و تپی شدگی از شمار دیگری از عناصر با ناسازگاری متوسط مانند Zr, Hf و MREE حکایت دارد که به گمان به سبب غنی شدگی ترجیحی منبع گوشته‌ای تپی شده آنها بوده است.

در سری‌های افیولیتی سنگ‌های فرامافیک یا به بخش گوشته‌ای و یا پلوتونیک سری تعلق داشته و در مقایسه با نمونه‌های فرامافیک فریمان که به وضوح فابریک سنگ‌های آتشفشانی را نشان می‌دهند فابریک متفاوتی دارند. لازم به ذکر است

با یکدیگر موازی هستند و سطح بالاتر الگوهای دو نمونه تولییتی و یک نمونه پیکروبازالتی در مقایسه با الگوهای دو نمونه پیکریتی را می‌توان بر اساس ترکیب فرامافیک و انباشت اولیون در دو نمونه پیکریتی توضیح داد. شیب دیده شده در بخش عناصر خاکی کمیاب سنگین بر اساس حضور گارنت در منبع توجیه شده است. نظیر همین سیما را در الگوی رسم شده برای سنگ‌های کماثیتی-بازالت کماثیتی (شکل ۱۷B) هم می‌توان مشاهده کرد اما در مقایسه با الگوی نمونه‌های پیکریتی الگوی نمونه‌های کماثیتی در بخش عناصر LILE از سیمای تپی شده برخوردار است و شکل کلی الگوها کوژ است. سیمای یاد شده را در الگوی نمونه‌های پیکریتی-تولییتی نمی‌توان مشاهده کرد لذا می‌توان نتیجه گرفت که در مقایسه با منبع گوشته‌ای این سنگ‌ها، منبع گوشته‌ای نمونه‌های کماثیتی یک منبع تپی شده همانند منبع بسیاری از دیگر کماثیت‌ها (Arndt & Nisbet, 1982; Arndt et al., 1998) بوده است. الگوهای مربوط به سه نمونه بحث انگیز F89, F57, F55 در شکل ۱۷C دیده می‌شود. در این شکل، الگوی نمونه‌های کماثیتی F17 و نمونه پیکروبازالتی F1 نیز برای مقایسه ارائه شده است. سه نمونه مورد بحث از سیماهای زمین‌شیمیایی متفاوتی در مقایسه با نمونه‌های کماثیتی و پیکروبازالتی برخوردار است به این ترتیب که در بخش LILE الگوی این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه کماثیتی غنی‌تر و در مقایسه با نمونه پیکروبازالتی تپی‌تر است، در بخش LREE الگو نیز وضعیت کم و بیش به همین منوال است، ضمن آن که با توجه به روند دیده شده در بخش HREE الگوی این سنگ‌ها می‌توان نتیجه گرفت که برخلاف منبع گوشته‌ای مذاب‌های کماثیتی و پیکریتی منبع گوشته‌ای این نمونه‌ها فاقد گارنت بوده است. در حقیقت سیمای اصلی مشاهده شده در الگوی این سنگ‌ها تپی شدگی عمده آنها در بخش MREE است و شکل تقریباً کاو الگو مربوط به همین بخش می‌شود، سیمایی که پیش از این، با توجه به الگوی U شکل REE در این سه نمونه دیده شد. به طور کلی، این سه نمونه در مقایسه با الگوی عنکبوتی بونینیت‌ها، فاقد فرازهای Zr, La, Th, Sr و نشیب‌های Eu, Sm, Nd, Ta, Nb هستند و بنابر این نمونه‌های مورد بحث را به رغم برخوردارگی از برخی سیماهای زمین‌شیمیایی مانند بونینیت‌ها نمی‌توان به عنوان بونینیت معرفی کرد. با این حال، فرایند تشکیل مذاب ممکن است مانند آنچه در مورد بونینیت‌ها مطرح شده، حاصل آمیختگی دو ترکیب با ویژگی‌های متفاوت، شامل ترکیب تپی شده، نظیر منبع گوشته‌ای مورب و ترکیب غنی شده، نظیر ترکیب نمونه F1 که به احتمال محصول درجات پایین ذوب بخشی در فشار بالا باشد.

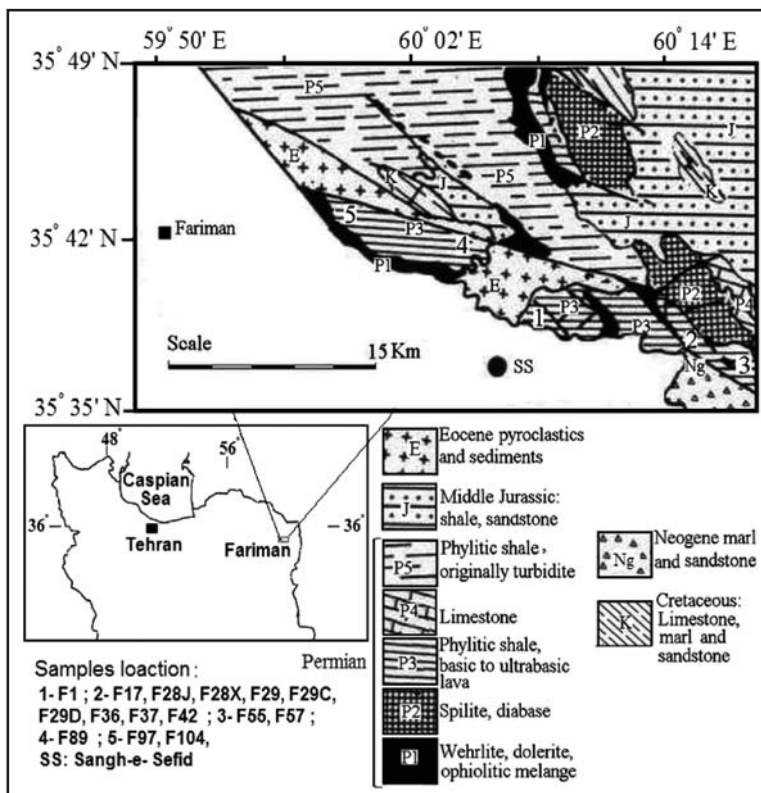
## ۸. شیمی بلورهای اولیون

در جداول ۳ و ۴ داده‌های مربوط به تجزیه بلورهای اولیون در نمونه‌های فرامافیک F42, F37, F28X, F17 به ترتیب بر حسب درصد وزنی اکسیدهای سازنده و بر حسب تعداد نسبی کاتیون‌ها ارائه شده است. در شکل ۱۸ چگونگی تغییرات عدد منیزیم ( $Mg^* = Mg/Mg+Fe$ ) در برابر تغییرات برخی از سازنده‌های اصلی و فرعی در بلورهای اولیون دیده می‌شود. رابطه مستقیم اکسیدهای نیکل و کروم با عدد منیزیم و رابطه عکس اکسیدهای آهن، منگنز، کلسیم با این پارامتر از تغییرات همسو در شیمی بلورها و مذاب در تعادل با آنها در جریان تبلور تفریقی حکایت دارد. علاوه بر این با توجه به مشاهدات سنگ‌نگاری مینی بر وجود بلورهای هم بعد و خود شکل اولیون که در مواردی به صورت نوک تیز یا توخالی و حاوی مذاب حبس شده بوده‌اند (شکل‌های ۳ و ۴) و همچنین عدم وجود آثار کرنش در بلورهای اولیون می‌توان اطمینان داشت این بلورها، اعم از درشت بلورها و یا ریز بلورهای زمینه، حاصل تبلور مذاب بوده و نمی‌توان آنها را به عنوان بیگانه بلورهای وابسته به متلاشی شدن بیگانه سنگ‌های سنگ‌کره‌ای که در ماگما پراکنده شده‌اند تفسیر کرد. بنابراین می‌توان

شود، در این صورت وجود یک حوضه اقیانوسی که به معنی جدا بودن حوضه کپه داغ از ایران مرکزی و البرز است، وجود حاشیه قاره‌ای فعال و سلسله وقایع فرو رانش و منضم شدن قطعاتی از پوسته اقیانوسی به حاشیه قاره‌ای اجتناب ناپذیر خواهد بود اما چنانچه سنگ‌های فرامافیک در توالی مورد بحث به عنوان گدازه‌های فرامافیک از نوع مفاکی تولیتی غنی از MgO با گرایش کماتیت معرفی شوند، در این صورت، تشکیل این سنگ‌ها و اضافه شدن توالی مورد بحث به پوسته قاره‌ای، باید در شرایط متفاوتی صورت پذیرفته باشد، برای مثال، در امتداد باز شدگی ناشی از کشش سنگ کره قاره‌ای همراه با تأثیرات وابسته به استقرار پلوم گوشته‌ای، زیرا در چنین شرایطی می‌توان وقوع درصد بالای ذوب بخشی سنگ‌های گوشته‌ای را که برای تشکیل ماگماهای فرامافیک ضروری است، توجیه کرد. جالب آن‌که اندیشه وجود یک کافت قاره‌ای را سال‌ها قبل (Stocklin 1974) مطرح کرد و منطقه مورد بحث را محل جدایش ابرقاره پانگه آ به دو قاره اوراسیا و گندوانا فرض می‌کند. افتخارنژاد و همکاران (۱۳۷۱) مجموعه سنگ‌های مورد بحث در شمال خطواره فریمان- تربت جام را به عنوان ادامه احتمالی بقایای بازشدگی که به پیدایش دیرینه تیس دوم یا تیس ایندوزنید منجر شده به شمار می‌آورد. تیس ایندوزنید، پیش‌تر توسط اشتوکلین، با تجدید نظر در گفته‌های قبلی خود (نقل از افتخارنژاد، و همکاران، ۱۳۷۱) و (Belov et al. 1986) تعریف شده است. نویسندگان یاد شده آثار تیس ایندوزنید را از طرف خاور از رودخانه سرخ در شمال ویتنام تا شمال تبت و افغانستان دنبال کرده و بدون اشاره به شواهد آن در ایران، دنباله آن را به جنوب دریای سیاه می‌رسانند. نکته مهم آن است که اکنون سنگ‌های فرامافیک شمال ویتنام به عنوان دومین نمونه کمیاب از سنگ‌های کماتیتی متعلق به فانروزویک شناخته می‌شوند (Hanski et al., 2004).

که صرف نظر از رخدادهای بونیتی تنها موارد گزارش شده از مشاهده گدازه‌های فرامافیک در مجموعه‌های افیولیتی به جریان‌های گدازه بالشی و توده‌ای سازند Othris، کوه‌های Agrilia، یونان مرکزی و گدازه‌های بالشی بالایی Troodos قبرس مربوط می‌شود. به نظر (Cameron & Nisbet 1982) این سنگ‌ها که با توجه به ویژگی‌های ژئوشیمیایی خود توسط برخی از نویسندگان از گرایش کماتیتی برخوردار هستند (مانند Paraskevopoulos & Economou, 1986) به عنوان نظایر فانروزویک بازالت‌های کماتیتی در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر این، میزان بسیار پایین  $P_2O_5$  و نسبت‌های بالا  $TiO_2 / P_2O_5$  در نمونه‌های کماتیتی فریمان (جدول ۳) با آنچه در سنگ‌های فرامافیک درونی مانند دونیت، هارزبورگیت و لرزولیت دیده می‌شود، مغایرت دارد (برای مثال Best, 2001 را ببینید). نسبت ذکر شده، اهمیت زیادی دارد، به گونه‌ای که (Nesbitt 1979) از این نسبت به عنوان معیار زمین‌شیمیایی تشخیص کماتیت‌ها از بازالت‌های افیولیتی کم  $TiO_2$  استفاده کرده و عقیده دارد که در کماتیت‌ها این نسبت در حدود ۱۰ یا بیشتر است در حالی که در بازالت‌های افیولیتی این نسبت بسیار پایین‌تر و در حدود ۳ است. نسبت یاد شده در نمونه‌های فریمان بسیار بالاتر از حد یاد شده است.

بنابر این شواهد زمین‌شیمیایی را که بر وجود منبع گوشته‌ای ناهمگن دلالت داشته بر اساس انگاره منبع پلوم گوشته‌ای می‌توان توجیه کرد ضمن آن که دیگر مشاهدات مانند شواهد وابسته به شیمی بلورهای اولیوین که از وجود مذاب‌های والد با دمای فراتر از حد عادی و میزان بالا MgO حکایت داشته و همچنین بافت‌های نامتعادل دیده شده در نمونه‌های فرامافیک و مافیک فریمان را که به فروتافت و رشد سریع بلورها در مذاب‌های فراتافته نسبت داده شد بر اساس انگاره پلوم گوشته‌ای قابل درک خواهد بود. دو دیدگاه مغایر مطرح شده در خصوص ماهیت مجموعه سنگ‌های فرامافیک- مافیک خاور خطواره تربت جام- فریمان مضامین ژئودینامیکی متفاوتی را در بر دارند. برای مثال، اگر مجموعه مورد بحث به عنوان یک سری افیولیتی در نظر گرفته



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در خاور فریمان، نقشه اصلی از افتخار نژاد و همکاران (۱۳۷۱) همراه با کمی تغییرات.



جدول ۲- داده‌های عناصر جزئی ۱۵ نمونه مافیک و فرامافیک منطقه فریمان که با استفاده از روش ICP-MS تهیه شده است.

Samples	F1	F17	F28J	F28X	F29	F29C	F29D	F36	F37
Ni	40.401	2009.321	1493.835	1994.011	104.099	1462.409	426.233	118.028	2018.088
Co	51.702	101.620	90.207	97.626	49.762	93.867	57.784	37.443	100.602
V	393.882	136.203	187.079	136.393	332.635	178.834	356.554	330.619	138.311
Ga	21.067	6.643	8.688	6.664	14.514	8.293	17.237	19.337	7.097
Mn	0.232	0.148	0.160	0.144	0.166	0.154	0.164	0.154	0.148
Hf	3.899	0.591	0.794	0.622	1.723	0.843	2.841	3.885	1.033
Nb	26.789	1.075	1.395	1.311	3.479	1.673	8.362	10.800	2.937
Ta	1.547	0.063	0.076	0.072	0.219	0.101	0.502	0.676	0.171
Th	1.768	0.074	0.091	0.094	0.253	0.119	0.770	1.062	0.248
Pb	2.102	0.119	0.506	0.095	0.218	0.387	0.177	0.319	0.039
U	0.413	0.016	0.023	0.030	0.080	0.033	0.206	0.562	0.066
Cs	2.000	0.042	18.439	1.581	0.164	3.694	0.831	1.320	0.240
Rb	2.208	3.687	20.363	2.276	5.245	7.516	1.666	29.621	3.189
Sr	254.339	48.148	54.970	27.435	133.987	41.437	157.506	218.562	31.954
Ba	130.403	5.383	8.010	14.500	45.986	179.720	46.691	127.666	19.658
Y	30.464	7.488	10.307	7.787	20.651	10.199	24.635	31.030	8.701
Cu	70.863	69.969	89.875	67.680	222.067	91.119	125.856	104.957	54.444
Zn	139.814	56.249	59.112	55.322	66.017	58.788	78.362	95.309	59.588
La	15.457	0.905	1.178	1.078	3.165	1.432	6.670	10.530	2.246
Ce	36.120	2.647	3.373	3.010	8.759	4.001	16.800	25.974	5.771
Pr	5.378	0.485	0.624	0.532	1.524	0.715	2.792	4.011	0.964
Nd	23.668	2.526	3.340	2.818	8.022	3.750	13.835	19.998	4.819
Sm	5.670	0.741	1.075	0.830	2.459	1.151	3.812	5.542	1.254
Eu	2.210	0.320	0.431	0.329	0.928	0.459	1.446	1.892	0.481
Gd	6.426	1.228	1.591	1.241	3.475	1.669	4.819	6.479	1.656
Tb	0.952	0.205	0.284	0.209	0.583	0.280	0.730	1.014	0.268
Dy	5.400	1.218	1.671	1.253	3.463	1.695	4.245	5.638	1.530
Ho	1.032	0.239	0.339	0.257	0.711	0.357	0.830	1.093	0.293
Er	2.557	0.646	0.893	0.688	1.847	0.911	2.100	2.789	0.752
Tm	0.374	0.102	0.142	0.101	0.281	0.136	0.302	0.402	0.109
Yb	2.304	0.599	0.858	0.648	1.760	0.838	1.848	2.368	0.667
Lu	0.350	0.094	0.133	0.101	0.261	0.132	0.274	0.370	0.092



شکل ۲ - A) توالی مورد مطالعه و توسعه برگ‌وارگی به موازات لایه‌بندی در واحدهای رسوبی پلیتی، دید به سمت باختر. B) گدازه‌های فرامافیک با فابریک بالشی در رخنمون‌های نقطه شماره ۲، دید به سمت جنوب باختری.

جدول ۱- داده‌های عناصر اصلی، فرعی و عناصر کمیاب Sc, Zr, Cr مربوط به ۱۵ نمونه فرامافیک و مافیک منطقه فریمان که با استفاده از روش XRF تهیه شده است.

Samples	F1	F17	F28J	F28X	F29	F29C	F29D	F36	F37	
SiO <sub>2</sub>	45.057	43.812	45.032	43.671	48.666	45.139	48.774	51.338	43.646	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.169	5.574	7.568	5.762	13.636	7.331	13.135	14.423	5.459	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.900	11.807	12.316	11.779	12.572	12.878	12.852	10.636	12.150	
MgO	7.397	32.771	26.731	32.202	8.316	26.094	10.447	5.908	33.081	
CaO	5.392	5.382	6.954	6.150	12.087	7.897	9.234	9.229	4.886	
Na <sub>2</sub> O	2.862	0.000	0.000	0.000	3.202	0.000	3.305	4.873	0.000	
K <sub>2</sub> O	0.091	0.167	0.231	0.027	0.043	0.051	0.079	1.111	0.078	
TiO <sub>2</sub>	4.412	0.496	0.659	0.534	1.243	0.685	1.875	2.143	0.768	
MnO	0.262	0.169	0.189	0.177	0.178	0.179	0.173	0.157	0.165	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.457	0.004	0.013	0.007	0.057	0.017	0.127	0.182	0.031	
LOI	6.330	6.770	8.060	9.690	3.060	7.820	4.100	3.340	9.580	
Total	99.611	100.786	100.495	99.932	99.862	99.758	99.725	99.993	100.447	
Mg- no	0.437	0.846	0.811	0.844	0.567	0.801	0.617	0.524	0.844	
C a O / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.355	0.966	0.919	1.067	0.886	1.077	0.703	0.640	0.895	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / TiO <sub>2</sub>	3.438	11.245	11.487	10.788	10.973	10.698	7.005	6.731	7.106	
Zr	165.6	20.7	27.7	22.3	64.1	31	114.3	148.7	39	
Cr	10.372	3403.2	2723.4	3375.0	207.5	2222.3	843.3	86.0	3035.0	
Sc	43.3	22.5	27.4	20.6	38.2	20.1	38.1	31.7	18.6	
Samples	F42	F55	F57	F89	F97	F104	StDev	Ins.Re(σ)	Sam.Re	Ac.(rmsd)
SiO <sub>2</sub>	44.843	46.477	48.844	43.273	48.069	49.843	0.030	0.060	0.220	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.181	14.779	12.782	7.352	11.130	14.515	0.020	0.050	0.120	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.662	11.886	12.625	12.951	11.633	11.903	0.020	0.050	0.050	
MgO	31.070	11.467	11.312	31.766	16.198	8.920	0.030	0.060	0.080	
CaO	5.251	12.526	11.072	4.508	10.104	9.477	0.010	0.060	0.050	
Na <sub>2</sub> O	0.000	2.075	2.805	0.000	1.675	3.768	0.030	0.010	0.060	
K <sub>2</sub> O	0.095	0.006	0.008	0.069	0.009	0.063	0.007	0.005	0.020	
TiO <sub>2</sub>	0.866	0.553	0.379	0.214	0.948	1.287	0.009	0.013	0.010	
MnO	0.170	0.186	0.149	0.186	0.201	0.176	0.002	0.003	0.010	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.036	0.044	0.023	0.001	0.034	0.049	0.003	0.023	0.010	
LOI	8.380	4.640	3.940	9.560	3.950	3.090				
Total	99.787	100.043	99.857	100.287	99.458	99.955				
Mg- no	0.841	0.656	0.640	0.829	0.734	0.597				
C a O / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.850	0.848	0.866	0.613	0.908	0.653				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / TiO <sub>2</sub>	7.134	26.705	33.681	34.381	11.746	11.275				
Zr	46.3	29.3	18.2	9.2	44.3	54.8	0.9	1	14.8	
Cr	2488.3	712.3	1616.8	4709.5	2631.4	146.4	2.1	1.1	11.0	
Sc	19.4	56.5	45.8	24.8	36.7	47.1	0.9	1.5	2.4	

جدول ۳- برخی از نسبت‌های مهم بین عناصر ناسازگار و نامتحرک نمونه‌های فریمان.

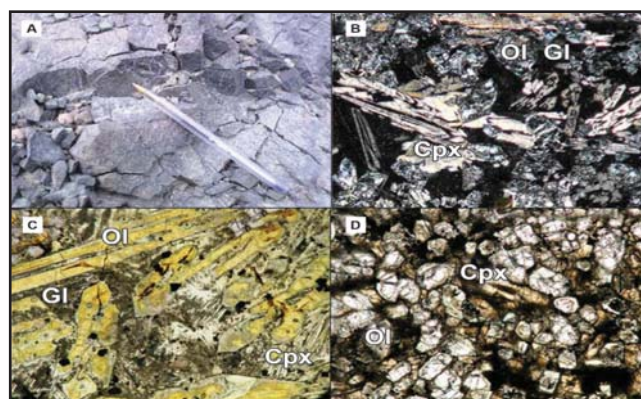
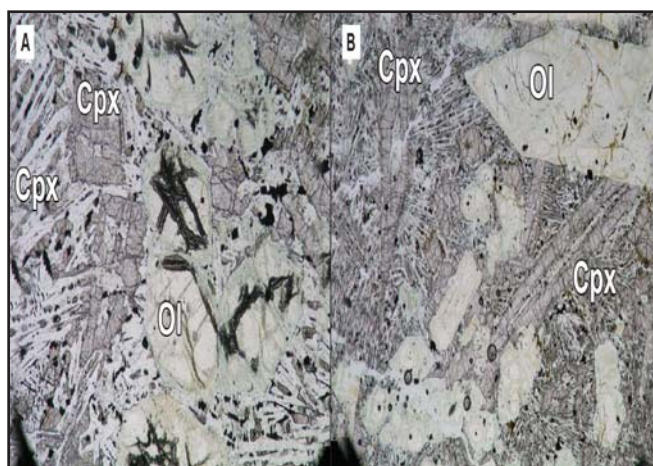
Sample	TiO <sub>2</sub> /P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	[La/Sm] <sub>N</sub>	[Th/Sm] <sub>N</sub>	La/Nb	Nb/Y	Nb/Th	Nb/U	Th/U	Zr/Nb	[Zr/Nb] <sub>N</sub>	Th/Ce	Ti/Zr	Zr/Y
F1	9.7	1.762	1.629	0.58	0.879	15.15	64.86	4.28	6.18	0.394	0.049	159.7	5.436
F17	116.5	0.790	0.522	0.84	0.144	14.53	67.19	4.63	19.26	1.226	0.028	143.5	2.764
F28J	51.0	0.708	0.442	0.84	0.135	15.33	60.65	3.96	19.86	1.264	0.027	142.6	2.687
F28X	80.3	0.840	0.590	0.82	0.168	14.00	43.70	3.12	17.01	1.083	0.031	143.6	2.864
F29	21.9	0.832	0.537	0.91	0.168	13.75	43.49	3.16	18.42	1.173	0.029	116.2	3.104
F29C	39.4	0.804	0.540	0.86	0.164	14.06	50.70	3.61	18.53	1.180	0.030	132.5	3.040
F29D	14.8	1.131	1.055	0.80	0.339	10.86	40.59	3.74	13.67	0.870	0.046	98.3	4.640
F36	11.8	1.228	1.001	0.98	0.348	10.17	19.22	1.89	13.77	0.877	0.041	86.4	4.792
F37	24.9	1.158	1.033	0.76	0.338	11.84	44.50	3.76	13.28	0.845	0.043	118.1	4.482
F42	24.0	1.053	0.830	0.95	0.302	10.74	25.27	2.35	14.09	0.897	0.039	112.2	4.250
F55	12.6	2.625	3.134	0.51	0.501	13.40	59.70	4.46	3.61	0.230	0.076	113.2	1.810
F57	16.5	2.270	3.305	0.62	0.225	8.92	38.60	4.33	5.48	0.349	0.092	125.0	1.236
F89	194.0	2.824	2.466	1.02	0.235	9.04	43.40	4.80	4.71	0.300	0.059	139.3	1.107
F97	28.3	1.019	0.766	1.06	0.205	10.19	29.65	2.91	14.94	0.951	0.036	128.2	3.064
F104	26.5	0.997	0.834	0.88	0.223	11.00	30.51	2.77	12.30	0.783	0.040	140.8	2.737

جدول ۴- داده‌های مربوط به تجزیه نقطه‌ای بلورهای اولیون در نمونه‌های فرامافییک F42, F37, F28X, F17 بر حسب درصد وزنی اکسیدهای سازنده، N تعداد نقاط تجزیه شده در هر نمونه است.

Sample	N	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	MnO	FeO	NiO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total
Average F17	13	40.6	0.00	0.11	0.12	48.1	0.29	0.16	10.5	0.39	0.00	0.01	0.00	100.2
Average 28X	4	41.2	0.01	0.08	0.15	49.3	0.27	0.14	8.4	0.47	0.00	0.00	0.00	100.0
Average F37	11	40.1	0.01	0.06	0.10	47.3	0.36	0.17	11.5	0.38	0.00	0.01	0.01	100.0
Average F42	2	39.7	0.01	0.09	0.19	50.7	0.23	0.12	8.0	0.42	0.00	0.01	0.00	99.4
Max Fo in F28X	1	41.1	0.01	0.07	0.13	48.7	0.29	0.16	9.4	0.46	0.01	0.00	0.00	100.4

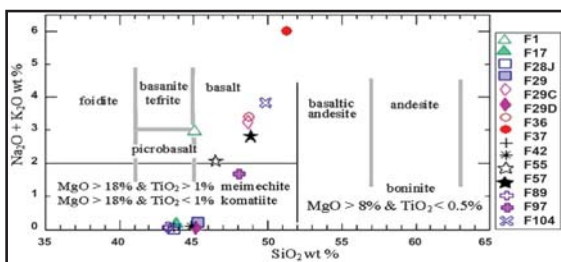
جدول ۵- داده‌های مربوط به تجزیه نقطه‌ای بلورهای اولیون در نمونه‌های فرامافییک F42, F37, F28X, F17 بر حسب تعداد کاتیون‌ها که بر اساس ۱۲۴ اکسیژن در فرمول محاسبه شده است.

Sample	N	Si	Ti	Al	Cr	Mg	Ca	Mn	Fe	Ni	Na	K	P	Total	#Mg
Average F17	13	5.99	0.00	0.02	0.01	10.57	0.05	0.02	1.29	0.05	0.00	0.00	0.00	17.99	0.89
Average 28X	4	6.03	0.00	0.01	0.02	10.76	0.04	0.02	1.03	0.05	0.00	0.00	0.00	17.96	0.91
Average F37	11	5.97	0.00	0.01	0.01	10.47	0.06	0.02	1.44	0.05	0.00	0.00	0.00	18.02	0.88
Average F42	2	5.86	0.00	0.02	0.02	11.14	0.04	0.02	0.99	0.05	0.00	0.00	0.00	18.13	0.92
Max Fo in F28X	1	6.02	0.00	0.01	0.02	10.96	0.04	0.01	0.83	0.06	0.00	0.00	0.00	17.96	0.93

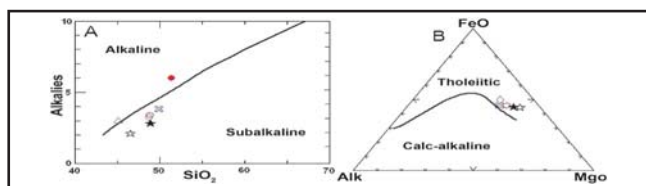


شکل ۴- تصاویری از بافت‌های نامتعادل در روانه پیکریتی. (A) بافت گدازه پیکریتی بالشی شامل اولیون‌های هم‌بعد شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار توخالی و حاوی مذاب درگیر (Ol) کلینوپیروکسن‌های توخالی و تارمانند (Cpx)، عرض تصویر ۱/۴mm است و در وضعیت PPL تهیه شده است. (B) گدازه پیکریتی با فابریک برشی شامل بلورهای اولیون شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار، کلینوپیروکسن‌های هم‌بعد، کشیده، توخالی و تارمانند با آرایش شعاعی، عرض تصویر ۲/۹mm است و در وضعیت XPL تهیه شده است.

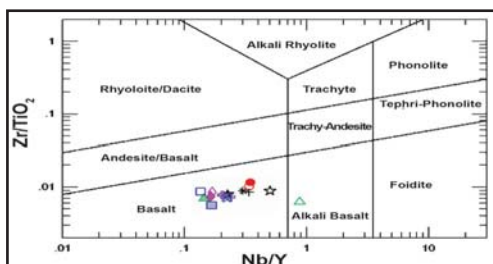
شکل ۳- تصاویری از بخش‌های مختلف روانه گدازه کماثیتی لایه‌ای. (A) بخش برشی، بر سطح سنگ ترک‌های متعدد و ظریف را می‌توان مشاهده نمود. (B) تصویر بافت میکروسکوپی از بخش برشی، شامل دانه‌های هم‌بعد، شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار اولیون (Ol) که به طور کامل به سرپانتین تبدیل شده، کلینوپیروکسن‌های سوزنی و اسکلتی (Cpx) و مواد شیشه بین‌دانه‌ای، عرض تصویر در حدود ۱/۴۵ mm است و در وضعیت XPL تهیه شده است. (C) تصویر بافت میکروسکوپی از بخش اولیون میکرو اسپینفکس شامل بلورهای توخالی و ناودانی شکل اولیون که به سرپانتین تبدیل شده‌اند، پیروکسن‌های نازک تارمانند با آرایش شعاعی و مواد شیشه‌ای قهوه‌ای رنگ، عرض تصویر ۲/۹mm است و در وضعیت PPL تهیه شده است. (D) تصویر بافت میکروسکوپی از بخش انباشتی شامل بلورهای هم‌بعد، شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار اولیون و پیروکسن‌های توخالی، عرض تصویر ۲/۵mm است و در وضعیت XPL تهیه شده است.



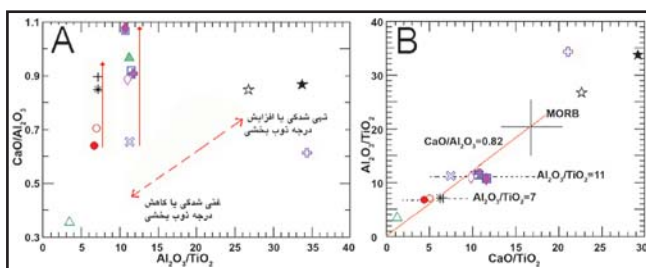
شکل ۶- نامگذاری نمونه‌های فریمان با استفاده از نمودار سیلیس در برابر مجموع قلیایی‌ها (LeBas, 2000).



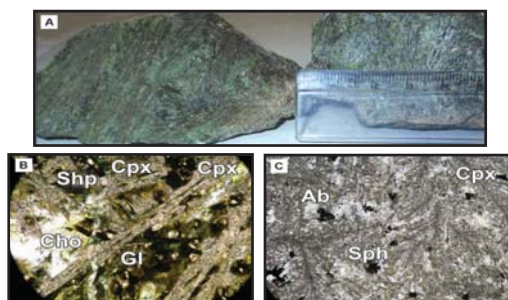
شکل ۸- بررسی ماهیت نمونه‌های مافییک فریمان با استفاده از نمودارهای ارائه شده توسط Irvine & Baragar (1971) برای تفکیک انواع بازالت‌ها. نمادهای رسم شده برای نمونه‌ها مانند شکل ۶.



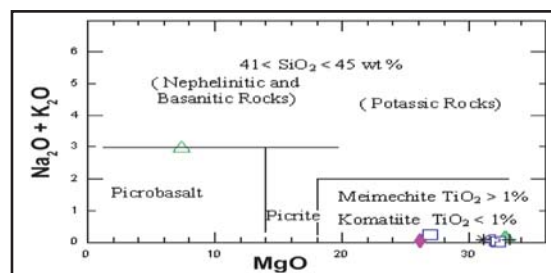
شکل ۹- نامگذاری نمونه‌های فریمان با استفاده از نسبت‌های عناصر ناسازگار و نام‌ترک. نمودار اولیه از Winchester & Floyd (1977) که توسط Pearce (1996) بازبینی و مجدداً رسم شده است. نمادهای رسم شده برای نمونه‌ها مانند شکل ۶.



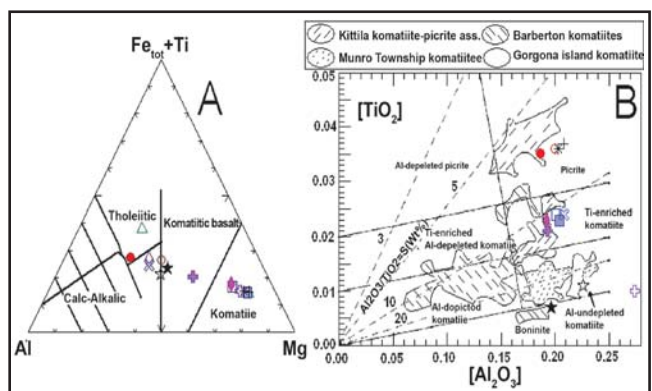
شکل ۱۱- (A) نمودار تغییرات نسبت  $Al_2O_3/TiO_2$  در برابر  $CaO/TiO_2$  نمونه‌های فریمان، خط مممد قائم تغییرات نسبت  $CaO/Al_2O_3$  را در مقادیر ثابت نسبت  $Al_2O_3/TiO_2$  نشان می‌دهد و خط چین مایل نحوه تأثیر فرایندهای تهی‌شدگی و غنی‌شدگی و درجه ذوب بخشی را بر این نسبت‌ها نشان می‌دهد. (B) نمودار تغییرات نسبت  $CaO/TiO_2$  در برابر  $Al_2O_3/TiO_2$ ، خطوط متقاطع نمایانگر مقادیر کندریتی این نسبت‌ها و خط رسم شده مقدار این نسبت‌ها را در نمونه‌های مورب برخوردار از نسبت‌های کندریتی (Nesbitt et al., 1979) نشان می‌دهد. نمادهای رسم شده برای نمونه‌ها مانند شکل ۶.



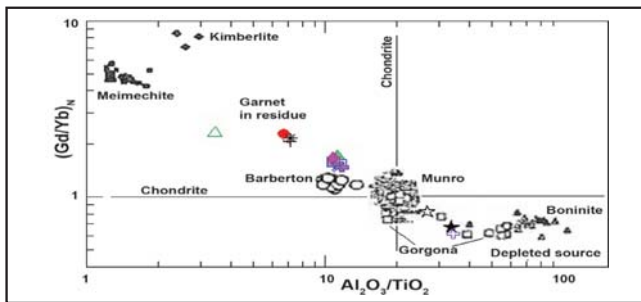
شکل ۵- دایک مافییک با بافت پیروکسن اسپینفکس. (A) در نمونه دستی سمت چپ دسته‌های تقریباً موازی از بلورهای کشیده کلینوپیروکسن با طول بیشتر از ۵ cm دیده می‌شود، در مواردی که سطح برش بلور ورقی شکل را با زاویه مایل قطع کرده، بلور به صورت نوارهای پهن بر سطح سنگ دیده می‌شود. (B) تصویر میکروسکوپی از بافت همین سنگ که شامل بلورهای کشیده و توخالی کلینوپیروکسن (Cpx)، کلریت (Cho)، شیشه (Gl) و اسفن (Sph) است، عرض تصویر ۱۴mm بوده و در وضعیت PPL تهیه شده است. (C) نمونه بازالت کماتیتی شامل کلینوپیروکسن‌های شاخه‌ای و هم‌رشد با پلاژیوکلاز آلبیتی (Ab) شده، عرض تصویر ۳mm بوده و در وضعیت PPL تهیه شده است.



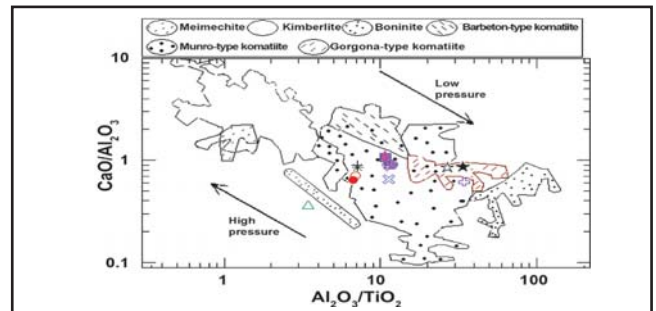
شکل ۷- نامگذاری نمونه‌های فریمان با استفاده از نمودار MgO در برابر مجموع قلیایی‌ها (LeBas, 2000). نمادهای رسم شده برای نمونه‌ها مانند شکل ۶.



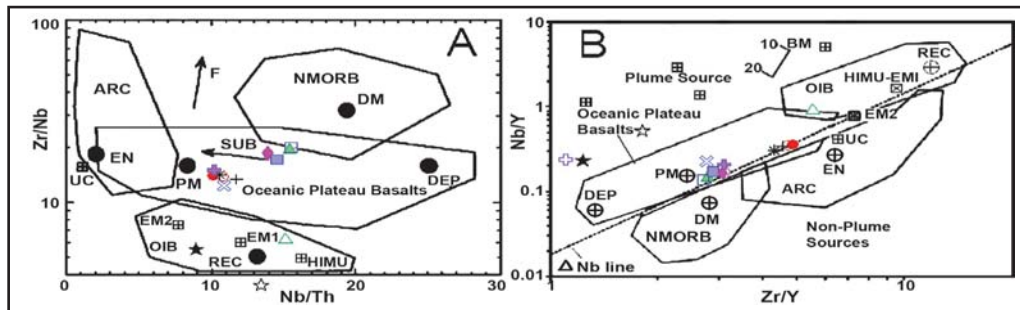
شکل ۱۰- (A) نام‌گذاری نمونه‌های فریمان با استفاده از نمودار مثلی Jensen & Pyke (1982) خط سرخ رنگ دامنه ترکیبی اولیون در نمونه‌های پیکریتی و کماتیتی را نشان می‌دهد. روند ترکیبی نمونه‌های فرامافییک با فرایند انباشت اولیون در این سنگ‌ها سازگاری دارد. (B) موقعیت نمونه‌های فریمان در نمودار نسبت مولی  $TiO_2$  در برابر نسبت مولی  $Al_2O_3$  (Hanski et al., 2001)، در مقیاس به موقعیت مجموعه کماتیتی-پیکریتی Kittila و کماتیت‌های مونرو، باربرتون و گورگونا. نمادهای رسم شده برای نمونه‌ها مانند شکل ۶.



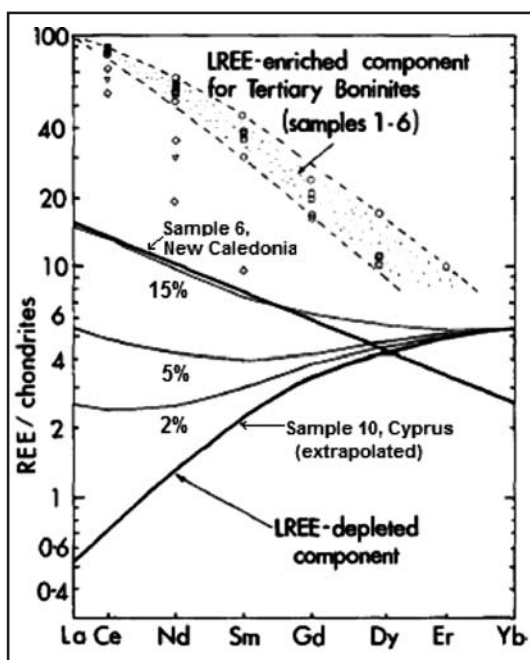
شکل ۱۲- نمودار  $Al_2O_3/TiO_2$  در برابر  $(Gd/Yb)_N$  بهنجار شده بر حسب نسبت گوشته اولیه، موقعیت نمونه‌های فریمان در مقایسه با انواع کمانتیت‌ها در مناطق باربرتون، مونرو و گورگونا و دیگر سنگ‌های آتشفشانی غنی از  $MgO$  شامل میرمیکت‌ها، کیمبرلیت‌ها و بونیت‌ها، محدوده مجموعه‌های سنگی مختلف از (Arndt (2003). نمادهای رسم شده برای نمونه‌ها مانند شکل ۶.



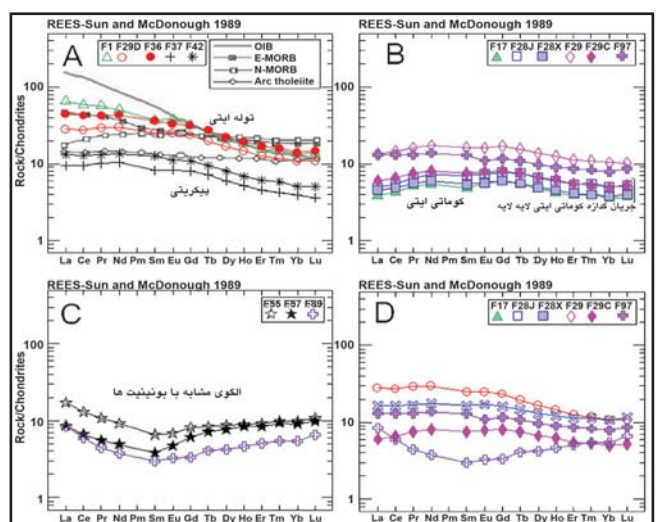
شکل ۱۳- نمودار  $Al_2O_3/TiO_2$  در برابر  $CaO/TiO_2$  در مقایسه با انواع کمانتیت‌ها در مناطق باربرتون، مونرو و گورگونا و همچنین دیگر سنگ‌های آتشفشانی غنی از  $MgO$  شامل میرمیکت‌ها، کیمبرلیت‌ها و بونیت‌ها، محدوده مجموعه‌های سنگی مختلف از (Arndt (2003). نمادهای رسم شده برای نمونه‌ها مانند شکل ۶.



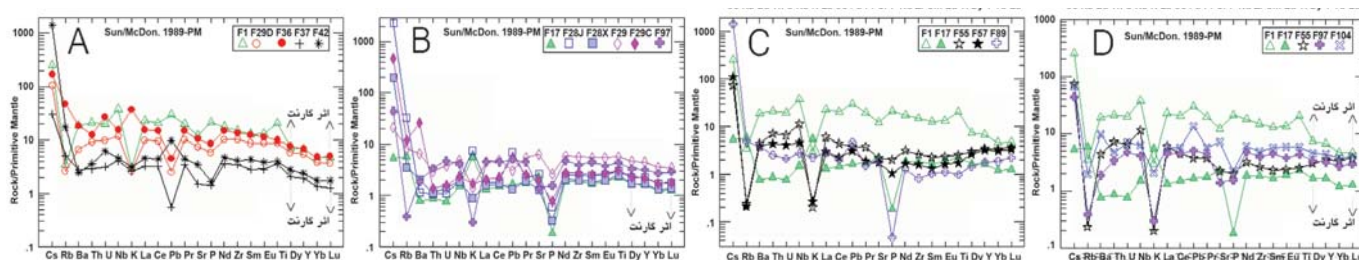
شکل ۱۴- (A و B) به ترتیب نمودارهای نسبت های  $Zr/Y$  در برابر  $Nb/Th$  و  $Nb/Y$  در برابر  $Zr/Nb$  در مقایسه با منابع گوشته‌ای و محدوده‌های مربوط به محیط‌های زمین‌ساختی مختلف. علائم به کار رفته در این نمودارها عبارتند از: جایگاه کمانی (ARC)، بازالت‌های جزیره اقیانوسی (OIB)، بازالت‌های دشت اقیانوسی و مورب عادی (NMORB). ترکیب منابع گوشته‌ای مختلف شامل منابع تهی شده کم ژرفا (DP) و پلوم ژرف (DEP)، غنی شده کم ژرفا شامل پوسته بالایی قاره‌ای و سنگ کره زیر قاره‌ای، گوشته اولیه (PM)، پوسته بالایی (UC)، سنگ کره اقیانوسی بازچرخه (REC) شامل ترکیبات EM1 و EM2 و منبع گوشته‌ای با  $\mu$  بالا (HIMU)، عبارت است از نسبت در نمودار A نحوه تأثیر ۱۰ تا ۲۰ درصد ذوب تعادلی بر این نسبت‌ها را نشان می‌دهد و فلش‌ها در نمودار B آثار ناشی از ۱۰ تا ۲۰ درصد ذوب تعادلی (F) و فرورانش (SUB) را بر ترکیب مذاب نشان می‌دهد. نمودار A از (Condie (2005) و نمودار B از (Viruete et al. (2007). نمادهای رسم شده برای نمونه‌ها مانند شکل ۶.



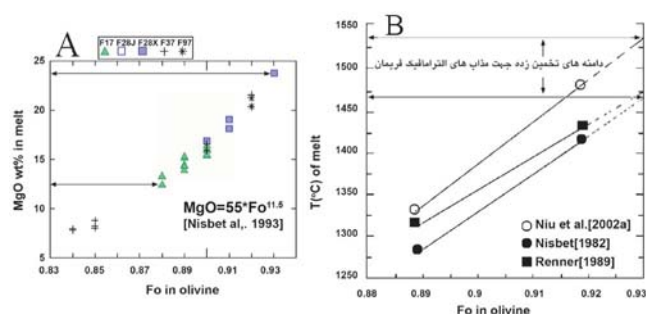
شکل ۱۵- الگوهای مختلف REE در نمونه‌های فریمان. (A) الگوهای پیکریتی-تولیتی، (B) الگوی کمانتیتی، (C) الگوی شبه بونیتی و (D) مقایسه الگوهای مختلف. الگوهای مربوط به بازالت‌های جزیره اقیانوسی (OIB)، مورب غنی شده (E-MORB)، مورب عادی (NMORB) و تولیت کمانی از (Fang Niu (2003) اقتباس شده است.



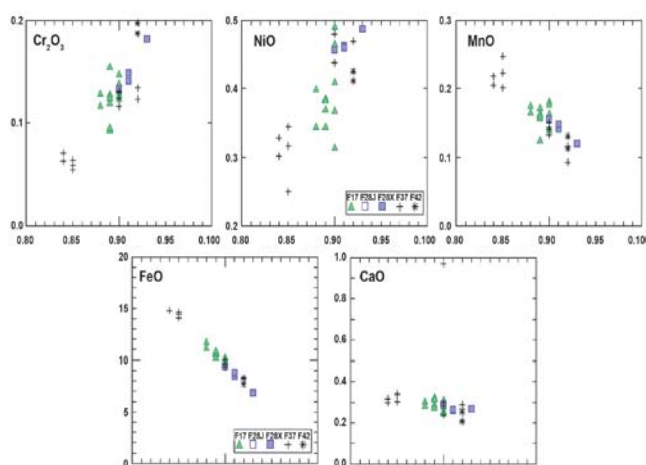
شکل ۱۶- چگونگی شکل‌گیری الگوی U شکل REE در نتیجه ادغام الگوهای تهی شده و غنی شده از REE (Cameron et al., 1983).



شکل ۱۷- الگوهای عنکبوتی نمونه های فریمان، بهنجار شده برحسب مقادیر گوشته اولیه از (Sun & McDonough (1989). A. نمونه های پیکریتی - تولیتی، B) نمونه های کماثیتی و کماثیت بازالتی، C) نمونه های کماثیتی و کماثیت بازالتی که از الگوهای عناصر خاکی کماثی U شکل برخوردار هستند همراه با الگوی نمونه پیکروبازالتی F1 برای مقایسه، D) الگوهای مختلف مشاهده شده برای مقایسه. در نمونه های پیکریتی- تولیتی و کماثیتی تأثیر حضور گارنت در منبع گوشته ای را با توجه به شیب دیده شده در بخش عناصر خاکی کماثی سنگین می توان مشاهده کرد.



شکل ۱۹- A) محاسبه میزان MgO در مذاب بر اساس میزان Fo در بلورهای اولیوین و با استفاده از فرمول تجربی (Nisbet et al., 1993). B) برآورد دمای مذاب با استفاده از میزان Fo در بلورهای اولیوین و بر اساس سه مدل مختلف. پیشینه دما با در نظر گرفتن بالاترین میزان Fo در بلورهای اولیوین و بر اساس مدل (Niu et al., 2002a) در حدود ۱۵۳۵°C و کمینه آن بر پایه مدل (Nisbet 1982) در حدود ۱۴۷۰°C برآورد می شود.



شکل ۱۸- تغییرات برخی از اکسیدهای عناصر اصلی و فرعی در برابر تغییرات عدد تمیزیم در بلورهای اولیوین.

## کتابنگاری

افتخارنژاد، ج. و بهروزی، ا.، ۱۳۷۰- یافته های جدید از سنگ های افیولیتی و سنگ های پالئوزویک پایانی در شمال خاوری خراسان (از جمله کپه داغ) و اهمیت ژئودینامیکی آن. فصلنامه علوم زمین، سال اول شماره اول، ص ۴-۱۵.

افتخار نژاد، ج.، اسدبان، ع.، راستگار میرزایی، ع.، ۱۳۷۱- سن مجموعه دگرگونه ها و افیولیت های شاندرمن- اسالم و ارتباط ژئودینامیکی آنها با پالئوتیتس و پوسته شبه اقیانوسی دریای خزر. فصل نامه علوم زمین، بهار ۷۱، سال اول شماره ۳.

پورلطیفی، ا.، علوی نائینی، م.، شجاعی، ن.، Vedige, M.، بهرمند، م.، واعظ، ف.، ۲۰۰۱- نقشه زمین شناسی ورقه طبقه مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰، سازمان زمین شناسی کشور، مرکز مشهد.

سبزه ئی، م. و پورلطیفی، ع.، ۱۳۷۴- ماگمای افیولیتی و نقش آن در تکوین افیولیت های ایران، برداشت هایی از گدازه های الترابازیک با گرایش کماثیتی، چهاردهمین گردهمایی علوم زمین. سازمان زمین شناسی کشور.

طاهری، ج. و قائمی، ف.، ۱۹۹۴- نقشه زمین شناسی ورقه مشهد مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰، سازمان زمین شناسی کشور. مرکز مشهد.

معاف پوریان، غ.، پورمعافی، م. و وثوقی عابدینی، م.، ۱۳۸۶- بررسی پتروژنیک جریان گدازه کماثیتی لایه در شرق فریمان، یازدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.

هوشمند زاده، ع.، ۱۳۷۱- پتروژن سنگ های دگرگونه، ترجمه شده، نویسنده Winkler, H.G.F., 1974.

## References

Alavi, S. M., 1991- Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran., Geol. Soc.Amer., Bull., V.103, pp : 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., 1986- Diffrentiation of komatiite flows. Journal of Petrology, Vol, 27, part2, pp. 279-301.

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

Arndt, N.T., Naldrett, A. J., Pyke, D. R., 1977- Komatiitic and Iron-rich tholeiitic lavas of Munro Township, Northeast Ontario. Journal of Petrology, Vol, 18,

- part 2, pp. 319-369.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981- Towards a palaeogeography and tectonic evolution of Iran. *Can. J. Earth Sci.*, 18, 210-265.
- Best, M. G., 2001- *Igneous petrology*. By Blackwell Science,inc.
- Bozorgnia, F., 1973 - Paleozoic foraminiferal biostratigraphy of central and east Elbruz mountains , Iran - National Iranian oil company, geological laboratories , publ. No 4 , Tehran.
- Belov, A. A., Gatnskyvu, G., Mossakovsky, 1986- A Precs on pre-Alpine Tectonic History of Tethyan Paleooceans, *Tectonophys*, 127, pp. 197-211,
- Cameron, W. E., McCulloch, M. T., Walker, D. A., 1983- Boninite petrogenesis: chemical and Nd-Sr isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 65, pp. 75-89.
- Cameron, W. E., Nisbet, E. G., 1982- Phanerozoic analogues of of komatiitic basalts. In: Arndt, N. T. & Nisbet, E. G., (eds) *Komatiites*. London: George Allen & Unwin, pp. 29 - 49.
- 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.
- Condie, K. C., 1999- Mafic crustal xenoliths and the origin of the lower continental crust, *Lithos*, 46, 95-101.
- Diefenbach, K. W., Davoudzadeh, M., Alavi-Tehrani, N. and Lensch, G., 1986 - Paleozoic ophiolites in Iran and geodynamic implication. *Ophioliti*, 1986, 11(3), 305 - 338.
- Fang, N., Niu, Y., 2003- Late Palaeozoic ultramafic lavas in Yunnan, SW China, and their geodynamic significance. *Journal of Petrology*, vol. 44, Number 1, pp. 141-157.
- Faure, F., Arndt, N., and Libourel, G., 2006- Formation of Spinifex Texture in Komatiites: an Experimental Study. *Journal of Petrology*, Vol, 47, Number 8, pp.1591-1610.
- 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, pp. 331-350.
- Fitton, J. G., Saunders, A. D., Norry, M. J., Hardarson, B. S., Taylor, R. N., 1997- Thermal and chemical structure of the Iceland plume. *Earth planetary science letters*. 153, pp.197- 208.
- Fleet, M. E., 1975- The growth habits of clinopyroxene. *Canadian Mineralogist*. Vol, 13, pp. 336-341.
- Hanski, E., Walker, r.j., Huhma, H., Polyakov, G. V., Balykin, P. A., Hoa, T. T. and Phuong, N. T., 2004- Origin of the Permian-Triassic komatiites, Northwestern Vietnam. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147, pp. 453-469.
- 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, pp. 855- 876.
- Herzberg, C., 1995- Generation of plume magmas through time: an experimental perspective. *Chemical Geology*, 126, pp. 1-16.
- Hill, R. E. T., Barnes, S. E., Dowling, S. E. , Thordarson, T., 2004- Komatiites and nickel sulphide ore bodies of the Black Swan area, Yilgarn Craton, Western Australia. *Petrology and volcanology of host rocks. Mineralium Deposita* 39, pp. 684-706.
- Hill, R. E. T., Barnes, S.J., Gole, M.J., Dowling, S.E., 1995- The volcanology of komatiites as deduced from field relationships in the Norseman-Wiluna greenstone belt, Western Australia. *Lithos*, 34, pp. 159-188.
- Kerr, A. C., Arndt, N. T., 2001- A note on IUGS reclassification of the high - Mg and picritic volcanic rocks. *Journal of Petrology*, Vol, 42 Number 11, pp. 2169 - 2171.
- Kerr, A. C., Marriner, G. F., Arndt, N.T., Tamey, J., Nivia, A., Saunders, A. D., Duncan, R. A., 1996- The petrogenesis of Gorgona komatiites, picrites and 4basalts: new field, petrographic and geochemical constraints. *Lithos*, 37, PP. 245-260.
- Kerrick, R., Wyman, D., Fan, J., Bleeker, W. Boninite series: low Ti-tholeiite associations from the 2.7 Ga Abitibi greenstone belt. *Earth and Planetary Science Letters* 164 (1998) 303-316.
- Kozur, H., Mostler, H. with a preliminary note by Ruttner A.W. ,1991- pelagic Permian Conodonts from an oceanic sequence at Sang-e-Sefid ( Farman, NE- Iran). *Abh Geol B-A* 38: 101- 110.
- LeBas, M. J., 2001- Reply to comment by Kerr and Arndt. *Journal of petrology*, Volume 42, Number 11, pp. 2173-2174.
- LeBas, M. J., 2000- IUGS Reclassification of high-Mg and picritic volcanic rocks. *journal of petrology* , Volume 41, Number 10 , 1467-1470.
- Lofgren, G. E., 1983- Effect of heterogeneous nucleation on basaltic textures: A dynamic crystallization study . *Journal of Petrology*, Vol. 24, part 3. pp. 229-255, 1983.
- Magidi, B., 1983 - The geochemistry of ultrabasic lava flow occurrence in north-east Iran. *G.S.I. rep.no.* 51, PP: 463 - 477.
- Magidi, B., 1981 - The ultrabasic lava flows of Mashhad ,NE Iran: *Geological magazine*, v.118, pp. 49-58.
- Nesbitt, R. W., Sun, S. S. and Purvis, A. C., 1979- Komatiites: Geochemistry and Genesis. *Canadian Mineralogist*. Vol, 17, pp. 165-186.
- 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, PP. 291-307.
- Nisbet, E. G., 1982- The tectonic setting and petrogenesis of komatiites. In: Arndt, N. T. & Nisbet, E. G., (eds) *Komatiites*. London: George Allen & Unwin, pp. 501-520.
- Niu, Y., Gilmore, T., Mackie, S., Greig, A. & Bach, W., 2002a- Mineral chemistry, whole-rock compositions and petrogenesis of ODP Leg 176 gabbros: data and discussion. In: Natland, J.H., Dick H.J.B., Miller, D.J. & Von Herzen, R.P. (eds) *Proceedings of Ocean Drilling Program Scientific Results*, 176. College Station, TX: Ocean Drilling Program, pp. 1-60. [On line.] Available at: <http://www.odp.tamu.edu/publications/176 SR/VOLUME/CHAPTERS/SR176 08.PDF>.
- Paraskevopoulos, G. M., Economou, M. I., 1986- Komatiite- type ultramafic lavas from the agrilia formation, otris ophiolite complex, Greece. *Ophioliti*, 11 (3), pp. 293-304.
- Renner, R., 1989- Cooling and crystallization of komatiite flows from Zimbabwe. Ph.D. Thesis, University of Cambridge, 162 pp.
- Sabzehei, M., 1996- Layered mafic-ultramafic komatiitic lava flows and their bearing on the problems of Iranian ophiolites. *30th Internat. Geol. Congress, Abstracts*, vol. 1, p. 296.
- Stocklin, J., 1977- Structural correlation of the alpine ranges between Iran and central Asia, *Memoir Hors Service Society Geologique France*, 8, 333-353.
- Stocklin, J., 1974 - Possible ancient continental margins in Iran. *Geology of continental margins* ( ed. C. A. Burk and C. L. Darke ) PP. 873 - 87. New York ; Springer - Verlag.
- Stocklin, J. and Nabavi, M. H., 1973- Tectonic map of Iran 1:2,500,000, *Geology survey of Iran*.
- Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran: a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52, 1229-1258.
- Vernon, R. H., 2004 - A practical guide to rock microstructure. Cambridge Univerity Press.
- Viruet, 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, pp. 1-19.