

# نقش ترکیبات مرتبط با فرورانش در منشأ ماگمای سازنده توالی پوسته‌ای افیولیت جنوب ده‌شیر

مرتضی خلعت‌بری جعفری<sup>۱\*</sup> و هادی سپهر<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۰۸

## چکیده

افیولیت تکتونیزه جنوب ده‌شیر در انتهای شمالی کمر بند افیولیتی شهر بابک- ده‌شیر، در حاشیه جنوبی خرده قاره ایران مرکزی رخنمون دارد و در بردارنده پریدوتیت‌های گوشته‌ای و توالی پوسته‌ای است. پریدوتیت‌های گوشته‌ای، سرپانتینی شده و در بردارنده هارزبورژیت کلینوپروکسن دار و لرزولیت هستند که توسط دایک‌های دیابازی منفرد قطع شده‌اند. توالی پوسته‌ای گابروی لایه‌ای ندارد و در بردارنده گابروهای ایزوتروپ با ویژگی‌های کومولایی است که به صورتی تدریجی و در بالا به کمپلکس دایک‌های ورقه‌ای دیابازی تبدیل و توسط ادخال‌های ورلیتی، دایک‌ها و پاکت‌های کوارتز دیوریت- کوارتز مونوزودیوریت و پگماتیت گابرو قطع شده‌اند. توالی آتشفشانی این مجموعه نیز شامل تناوبی از چرت، رادیولاریت، سنگ آهک پلاژیک دارای ریززایهای (میکروفونا‌های) کرتاسه بالایی در قاعده و برش هیالو کلاستیک، هیالو کلاستیت، توف، روانه صفحه‌ای و گدازه بالشی در بالای توالی است. بر اساس تجزیه‌های شیمیایی، سنگ‌های توالی پوسته‌ای تنوع ترکیبی و روند ماگمایی تولیتی تا کلسیمی- قلیایی نشان می‌دهند. در بررسی نمودارهای تکتونوماگمایی، این سنگ‌ها بیشتر در محدوده کمان‌های آتشفشانی و گاهی در قلمرو اقیانوسی جای گرفته‌اند. الگوهای بهنجار شده با مقادیر گوشته اولیه، ویژگی‌های افیولیت‌های فرافروانش مانند تهی شدگی از عنصر Nb در بیشتر تجزیه‌ها و Ti در برخی از آنها را دارد. این الگوها در ترازهای مختلفی جای گرفته‌اند و غنی شدگی متفاوت از عناصر LILE نشان می‌دهند که می‌تواند نشان دهنده ناهمگونی منبع گوشته‌ای و درجات متفاوت ذوب بخشی باشد. بررسی رفتار عناصر در نمودارهای مختلف و مقایسه آنها با مناطق تکتونوماگمایی شاخص، در قلمروهایی به دور از مورب و نزدیک به کمان و بررسی مقادیر برخی از عناصر مانند Ba، Th، Nb و Yb و نسبت‌های آنها نشان‌دهنده تأثیر متفاوت سیال‌های بر خاسته از صفحه فرورونده بر گوه گوشته‌ای دارد. این ویژگی‌های ژئوشیمیایی و رخنمون ادخال‌های (اینترورژن) ورلیتی و توده‌های کوچک کوارتز دیوریتی- کوارتز مونوزودیوریتی هورنبلندار، نشان می‌دهد که افیولیت جنوب ده‌شیر، مراحل متوالی از حوادث شامل تولد، جوانی و بلوغ یک افیولیت را پشت سر گذاشته است که پیامد طبیعی تشکیل افیولیت‌ها در سامانه‌های فرافروانش است. به نظر می‌رسد که افیولیت جنوب ده‌شیر در محدوده‌ای نزدیک به پیشانی کمان با فاصله اندکی از لبه آن تشکیل شده که با سناریوی فرورانش نئوتیس، طی کرتاسه بالایی قابل توجیه است.

**کلیدواژه‌ها:** افیولیت، پریدوتیت، گابروی ایزوتروپ، توالی پوسته‌ای، فرافروانش.

**\*نویسنده مسئول:** مرتضی خلعت‌بری جعفری

E-mail: khalat1965elive.com

## ۱- مقدمه

این داده‌ها با مقادیر استاندارد جهانی بهنجار شده و پس از رسم نمودارهای مختلف ژئوشیمیایی، نتایج حاصل در این نوشتار بحث شده است.

## ۲- زمین‌شناسی

در شکل ۲، ستون چینه‌شناسی نمادین (لوگ سنتتیک) از مجموعه افیولیتی تکتونیزه جنوب ده‌شیر همراه با تصاویر میکروسکوپی انتخابی نشان داده شده است. همان گونه که دیده می‌شود، این مجموعه شامل پریدوتیت‌های گوشته‌ای و توالی پوسته‌ای است. پریدوتیت‌های گوشته‌ای سرپانتینی شده هستند اما، بخش‌های سالمی از آنها ترکیب هارزبورژیت کلینوپروکسن دار و لرزولیت هستند که توسط دایک‌های دیابازی منفرد قطع شده‌اند. توالی پوسته‌ای درونی، در بردارنده گابروهای ایزوتروپ و کمپلکس دایک‌های ورقه‌ای دیابازی است که توسط ادخال‌های ورلیتی، کوارتز دیوریت- کوارتز مونوزودیوریت، پگماتیت گابرو و پلاژیوگرانیت- ترونجمیت قطع شده‌اند. توالی آتشفشانی (توالی خروجی) این مجموعه میان‌لایه‌هایی از چرت و رادیولاریت، سنگ آهک پلاژیک دارای ریززایهای کرتاسه بالایی در قاعده و همچنین برش هیالو کلاستیک، هیالو کلاستیت، روانه صفحه‌ای، توف و گدازه بالشی در بالای توالی دارد. گابروی لایه‌ای در توالی پوسته‌ای این محدوده دیده نشده است اما همبری بالای گابروهای ایزوتروپ با کمپلکس دایک‌های ورقه‌ای دیابازی به صورت تدریجی است. این دایک‌ها امتداد شمالی- جنوبی با چند درجه انحراف به سمت خاور و یا باختر دارند. لیستونیت و رودنگیت از جمله سنگ‌های

افیولیت تکتونیزه جنوب ده‌شیر در انتهای شمالی کمر بند افیولیتی ده‌شیر- بافت در حاشیه خرده‌قاره ایران مرکزی و در جنوب شهر ده‌شیر رخنمون دارد (شکل ۱). در این محدوده به واسطه عملکرد گسل ده‌شیر و شاخه‌های فرعی آن، رخنمون‌های این کمر بند افیولیتی به شکل گوه‌ای در آمده‌اند. این مجموعه تکتونیزه از باختر توسط گسل ده‌شیر به دشت ابرکوه و از خاور به سنگ‌های رسوبی ائوسن- نئوژن و سنگ‌های آتشفشانی ائوسن محدود شده است. پیشینه مطالعاتی و ویژگی‌های زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری- سنگ‌شناسی این مجموعه افیولیتی، خلعت‌بری جعفری و سپهر (۱۳۹۰) به تفصیل بحث شد. هدف از ارائه این مقاله شناسایی و معرفی نقش ترکیبات مرتبط با فرورانش (Subduction components) در منشأ ماگمای سازنده سنگ‌های توالی پوسته‌ای این مجموعه افیولیتی تکتونیزه است. در توالی‌های به هم ریخته این مجموعه افیولیتی، دگرگونی ناحیه‌ای دیده نشد و آثار دگرگونی به صورتی محدود و در امتداد پهنه‌های گسل خورده و برشی شده با ویژگی‌های دینامیک قابل تعقیب است، بنابراین از لفظ افیولیت ملائز اجتناب و از واژه افیولیت تکتونیزه که در قالب تعریف "مجموعه افیولیتی" (Ophiolitic assemblage) می‌گنجد (نقل از Juteau & Maury, 1999 & 2009) استفاده شده است.

به منظور بررسی‌های ژئوشیمیایی و تعیین موقعیت تکتونوماگمایی، پس از مطالعه سنگ‌نگاری و به منظور دست‌یابی به اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی و کمیاب، ۲۲ نمونه انتخاب، پس از خرد شدن با هاون دستی و پودر شدن با هاون آگات به آزمایشگاه ALS در Vancouver کانادا ارسال و به روش ICP-Mass تجزیه شدند.

متاسوما تیک هستند که به صورتی پراکنده در درون این مجموعه تکتونیزه رخنمون دارند. بلوک‌هایی نابرجا از آمفیبولیت و کلسیم-سیلیکات نیز دیده می‌شوند.

### ۳- سنگ‌نگاری

بررسی‌های سنگ‌نگاری میکروسکوپی پریدوتیت‌های سالم، نشان از بافت پورفیرو کلاستیک و الیون‌های کینک دارد (شکل ۲-الف). ارتوپروکسن به فراوانی دارای لامل‌هایی از کلینوپیروکسن است (شکل ۲-ب) و همراه با ارتوپروکسن و کلینوپروکسن دگرشکل دیده می‌شود که از جمله شواهد دگرشکلی گواشته‌ای است (Juteau & Maury, 1999 & 2009). گابروهای ایزوتروپ شامل تناوبی از الیون‌گابرو (شکل ۲-ب) و پیروکسن گابرو هستند و بافت کومولایی دارند، در حالی که در بخش‌های بالایی، هورنبلند گابرو با بافت هتراد کومولا فراوان است (شکل ۲-ت). کمپلکس دایک‌های ورقه‌ای دیابازی بافت ریزبلور و دیابازی (شکل ۲-ث) تا کمی فیریک دارند و کوارتز به صورت یک فاز کانیایی فرعی دیده می‌شود. کوارتز دیوریت دارای بافت پورفیریتیک و درشت‌بلورهای هورنبلند سبز است (شکل ۲-ج). پگماتیت گابرو نیز از نوع الیون‌گابرو و پیروکسن گابرو است و پلاژیوگرانیت بافت ریزبلورین و ترونجمیت بافت میکروپگماتیت گرافیک دارد (شکل ۲-چ). گدازه بالشی نیز بیشتر آفیریک است و به دلیل بلورهای پلاژیوکلاز به صورت متغیری بافت فیریک نشان می‌دهد (شکل ۲-ح) خمیره اینترسرتال همراه با میکروولیت‌های پلاژیوکلاز و ریزبلورهای کلینوپروکسن دارند. روانه صفحه‌ای نیز بافت میکروولیتیک جریانی دارد (شکل ۲-خ).

با توجه به لوگ سنتتیک (شکل ۲) و رخنمون آپوفیزهایی از کوارتز دیوریت-کوارتز مونوزودیوریت هورنبلنددار و ادخال‌های ورلیتی-الیون‌بستریتی، سنگ‌های این مجموعه افیولیتی انطباق قابل توجهی با افیولیت بالغ تعریف شده توسط Shervais et al. (2007), Shervais (2001) را دارند.

### ۴- ژئوشیمی و سنگ‌زایی

به منظور شناخت ویژگی‌های ژئوشیمیایی و جایگاه تکتون-ماگمایی مجموعه افیولیتی تکتونیزه جنوب ده‌شیر، نتایج تجزیه‌های شیمیایی در نمودارهای مختلف رسم (پلات) تجزیه و تحلیل شدند. تجزیه‌های توالی خروجی مانند روانه صفحه‌ای و گدازه بالشی دگرسانی شدیدی تحمل کرده‌اند، اما تجزیه‌های مربوط به توالی درونی مانند گابروها و کمپلکس دایک‌های ورقه‌ای دیابازی سالم تر هستند. به منظور نام‌گذاری ژئوشیمیایی و مقایسه آنها با بررسی‌های میکروسکوپی، نتایج تجزیه‌ها بر روی نمودار Le Bas et al. (1986) رسم شدند (شکل ۳). بر اساس این نمودار، گابرو ایزوتروپ و گابرو دیوریت فولیه هورنبلنددار در قلمرو بازالت، دایک‌های ورقه‌ای دیابازی در قلمروهای بازالت تا بازالتیک-آندزیت و روانه صفحه‌ای، گدازه بالشی و دایک‌های دیابازی منفرد در قلمروهای بازالت-تراکی بازالت، تا بازالتیک تراکی آندزیت، کوارتز دیوریت-کوارتز مونوزودیوریت در قلمروهای داسیت تا تراکی آندزیت و پلاژیوگرانیت-ترونجمیت در قلمروهای ریولیت تا تراکی داسیت واقع شده‌اند. به این ترتیب دیده می‌شود که توالی پوسته‌ای در این محدوده دارای تنوع و گوناگونی ترکیبی است. حال این سؤال مطرح است که ویژگی‌های ژئوشیمیایی ماگما/ماگماهای سازنده توالی پوسته‌ای چگونه بوده و چه تحولات سنگ‌زایی سبب گوناگونی ترکیبی در توالی پوسته‌ای محدوده مورد مطالعه شده است؟ با توجه به بالا بودن مقادیر عناصر کمیاب سبک در مقایسه با عناصر فرعی ناسازگار، پاسخ به این سؤال بدون در نظر گرفتن محیط تکتونوماگمایی دشوار است. به این دلیل، ابتدا به بحث در مورد محیط تکتونوماگمایی تشکیل و سپس به تفسیر تمرکز عناصر فرعی و کمیاب در نمودارهای عنکبوتی و نقش ترکیبات مرتبط با فرورانش در منشأ ماگما/ماگماهای سازنده توالی پوسته‌ای خواهیم پرداخت.

در شکل ۴ چند نمودار ژئوشیمیایی به منظور دست‌یابی به اهداف بیان‌شده، نشان داده شد. کاربرد اصلی این نمودارها در تمایز کلی افیولیت‌های تشکیل شده در سامانه‌های مورب (MORB) از افیولیت‌هایی است که در رابطه با فرورانش (فرافرورانش (سوپراساداکنشن) SSZ) تشکیل شده‌اند. این نمودارها از میان ده‌ها نمودار ژئوشیمیایی توسط Pearce (2003) انتخاب و توصیه شدند. نمودار نسبت FeO/MgO به  $TiO_2$ ، نمودار تاریخی پیشنهادی (Miyashiro 1973) است که در آن برای اولین بار نشان می‌داد که گدازه‌های افیولیت ترو دوس در قبرس و چند افیولیت دیگر منحنی‌های تفریق نوع کلسیمی-قلیایی هستند و به طور کلی با انواع مورب متفاوت هستند. این افیولیت‌ها در حال حاضر با عنوان فرافرورانش (سوپرا-سابداکنشن) خوانده می‌شوند. نمودار نسبت  $TiO_2$  به FeO/MgO نیز از دسته نمودار پیشین است با این تفاوت که قلمروهای مورب، بازالت میان اقیانوسی و فرافرورانش با دقت بیشتری تفکیک شده‌اند. تجزیه‌های توالی پوسته‌ای جنوب ده‌شیر در قلمرو فرافرورانش واقع شده‌اند و به روشنی روندهای تفریق کلسیمی-قلیایی را نشان می‌دهند. نمودار مثلثی Ta, Th, Hf به دلیل استفاده از عناصر ناسازگار به مراتب مفیدتر از انواعی است که بر پایه اکسیدهای اصلی طراحی شده و به دلیل فراوانی عنصر Th در گدازه‌های محیط‌های فرورانش توسط گروه ژئوشیمیست‌های آزمایشگاه پیرسو در پاریس برای تفکیک افیولیت‌های فرافرورانش از مورب‌ها توصیه شده‌اند (Juteau & Maury, 2009). در این نمودار قلمروهای BC، مورب، قلمرو A، افیولیت فرافرورانش و قلمروهای CD، بازالت اقیانوسی را معرفی می‌کنند. بیشتر تجزیه‌ها از توالی پوسته‌ای جنوب ده‌شیر در قلمرو فرافرورانش واقع شده‌اند. هورنبلند گابرو و یک تجزیه از پگماتیت گابرو در قلمرو مورب، یک نمونه از روانه صفحه‌ای در مرز مورب تا فرافرورانش (سوپرا-سابداکنشن) و دو تجزیه از گابرو و یک تجزیه از پگماتیت گابرو در حوالی قلمروهای مورب-بازالت اقیانوسی واقع شدند. نمودار نسبت Ta/Yb به Th/Yb نیز توسط Pearce (1982) پیشنهاد و توسط Pearce (2003) تصحیح شد. قلمروهای تولیتی، کلسیمی-قلیایی و شوشونیتی نیز از Faustino et al. (2006) برگرفته شده است. در این نمودار گابرو ایزوتروپ، پگماتیت گابرو و فرو دیاباز قطع‌کننده آنها و هورنبلند گابرو در قلمروی تولیتی با خاستگاه مورب تهی شده جای گرفته‌اند اما دایک‌های دیابازی ورقه‌ای و منفرد و کوارتز دیوریت-کوارتز مونوزودیوریت در قلمروهای تولیتی و کلسیمی-قلیایی واقع شده‌اند. یک تجزیه از این سنگ‌ها نیز متمایل به قلمرو قلیایی است. نمودار Ti-V توسط Shervais (1982) پیشنهاد شد و به فراوانی توسط متخصصان در تفسیر تجزیه‌های ژئوشیمیایی مناطق افیولیتی استفاده شد. گدازه‌های مناطق فرورانش در مقایسه با گدازه‌های پشته‌های میان اقیانوسی و جزایر اقیانوسی از عنصر Ti فقیر و از عنصر V غنی هستند. افزون‌بر این، این عنصر دارای ظرفیت‌های متغیری است که نسبت به فشار بخشی (فوگاسیتی) اکسیژن بسیار حساس است. در حالت ذوب بخشی آب‌دار، ظرفیت‌های ۴ و ۵ فراوان‌تر از ظرفیت ۳ هستند، بنابراین در مناطق فرورانش ناسازگاری بیشتری نشان می‌دهند. شاید به این دلیل است که گدازه‌های مناطق فرورانش که در شرایط ذوب بخشی آب‌دار شکل می‌گیرند در مقایسه با گدازه‌های مورب‌ها از عنصر V غنی‌تر هستند. جز دو نمونه از روانه صفحه‌ای که در قلمرو مورب رسم شدند، تجزیه‌ها در قلمرو کمان جای گرفته‌اند.

### ۵- رفتار عناصر در نمودارهای عنکبوتی

با بهنجار کردن نتایج تجزیه‌های شیمیایی با مقادیر استاندارد گواشته اولیه، مورب عادی و کندریت می‌توان به غنی‌شدگی و یا تهی‌شدگی منبع ماگما/ماگماهای سازنده، تحولات ماگمایی و روند تفریق پی‌برد. در این رابطه عناصر کمیاب و فرعی تجزیه‌های سنگ‌ها در محیط‌های تکتونوماگمایی مختلف، تمرکزهای متفاوتی را در نمودارهای عنکبوتی نشان می‌دهند. شکل ۵، نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده

عناصر HSFE مانند Nb, Ta و Ti به روشنی در الگوهای بهنجار شده این سنگ‌ها با گوشته اولیه دیده می‌شود (شکل ۵). شاید بتوان پراکندگی و تهی‌شدگی غیر عادی از عناصر Rb و Ba در یک نمونه از کوارتز دیوریت-کوارتز مونوزودیوریت را به عملکرد محلول‌های دگرسانی و تحرک این عناصر نسبت داد.

بررسی الگوهای بهنجار شده از تجزیه‌های این سنگ‌ها با مقادیر کندریت، نشان از غنی‌شدگی بیشتر آنها از LREE نسبت به HREE دارد که به صورت شیب تندتر الگوها نمایان است. این الگوها غنی‌شدگی از مرتبه ۴۰ تا ۱۰۰ برای عناصر کمیاب روشن و مرتبه ۲۰ برای عناصر تیره دارند و قابل مقایسه با محدوده میانگین T-MORB هستند.

بررسی الگوهای بهنجار شده تجزیه‌های مرتبط با پگماتیت گابرو و فرودپایاز قطع‌کننده آنها با مقادیر گوشته اولیه نشان می‌دهد که رفتار این عناصر شباهت زیادی با الگوهای گابرو ایزوتروپ دارد که می‌تواند نشانگر ویژگی‌های تهی‌شده منبع گوشته‌ای برای هر دو دسته از این سنگ‌ها باشد. این الگوها در ترازهایی پایین‌تر از الگوهای کمپلکس دایک‌های ورقه‌ای دیابازی قرار دارند که با اصل تفریق این سنگ‌ها به عنوان پیامدهای طبیعی تفریق دایک‌های ورقه‌ای دیابازی در تضاد است. بررسی الگوهای بهنجار شده این تجزیه‌ها با مقادیر کندریت نشان می‌دهد که این الگوها در مرتبه بین ۵ تا ۱۰ قرار می‌گیرند که الگوهایی خطی با شیبی مثبت است و در اثر تهی‌شدگی نسبی از عناصر LREE مانند La و Ce به وجود آمده است. در مجموع تهی‌شدگی پگماتیت گابروها از عناصر LREE و غنی‌شدگی نسبی آنها از عناصر HREE سبب شباهت الگوهای آنها با الگوهای گابرو ایزوتروپ و N-MORB شده است. الگوی بهنجار شده از فرودپایاز قطع‌کننده پگماتیت گابروها به رغم شباهت زیاد با آنها در ترازهای پایین‌تر قرار گرفته است. الگوهای پگماتیت گابرو همچنین پایین‌ترین تراز از محدوده میانگین N-MORB و دایک فرودپایاز قطع‌کننده آنها، در ترازهای پایین‌تر واقع شده‌اند که شاید نشانی از تهی‌شدگی منبع گوشته‌ای سازنده ماگما است. گفتنی است که یک نمونه از پگماتیت گابرو دارای غنی‌شدگی از عنصر Eu دارد که شاید بتوان این را با تمایل این عنصر به مشارکت در ترکیب کانی‌های پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن و فراوانی این کانی‌ها در پگماتیت گابرو توجیه کرد.

بررسی الگوهای بهنجار شده تجزیه‌های مرتبط با پلاژیوگرانیت-ترونجیت با مقادیر گوشته اولیه، نشان از وجود شباهت‌هایی با الگوهای کوارتز دیوریت-کوارتز مونوزودیوریت دارد. هر چند این الگوها غنی‌شدگی بیشتری از عناصر LREE نسبت به کوارتز دیوریت-کوارتز مونوزودیوریت دارند (تا مرتبه ۱۲۰) و تهی‌شدگی آنها از عنصر Ti به مراتب بیشتر است. اما همانند الگوهای کوارتز دیوریت-کوارتز مونوزودیوریت، غنی‌شدگی و تهی‌شدگی از Sr هستند که دلیل آن می‌تواند دگرسانی‌های بعدی باشد. بررسی الگوهای بهنجار شده تجزیه‌های مرتبط با پلاژیوگرانیت-ترونجیت با مقادیر کندریت نشان از غنی‌شدگی متفاوت آنها با الگوهای کوارتز دیوریت-کوارتز مونوزودیوریت از عناصر LREE دارد. الگوهای مرتبط با کوارتز دیوریت-کوارتز مونوزودیوریت متمایل به محدوده میانگین T-MORB هستند که ممکن است منبع گوشته‌ای ماگمای آن سست‌کره غنی‌شده باشد. در حالی که الگوهای سازنده پلاژیوگرانیت-ترونجیت شیب تندتری از عناصر کمیاب سبک به سمت عناصر کمیاب سنگین دارد که شاید بازتابی از منبع گوه‌ای گوشته‌ای تهی‌شده (depleted mantle wedge) باشد که توسط ترکیبات برخاسته از صفحه فرورونده، از عناصر کمیاب سبک غنی‌شده‌اند (Davidson, 1996; Thirwall et al., 1996; Dilek & Thy, 2006).

بالا بودن نسبت LREE/HREE و غنی‌شدگی از عناصر Sr و Rb, Ba, Th, U و تهی‌شدگی از عناصر HFSE، مانند Nb, Ta و Ti از جمله ویژگی‌های شاخص سری‌های کلسیمی-قلیایی جزایر کماتی و مجموعه‌های افیولیتی محیط‌های

با مقادیر استاندارد گوشته اولیه و کندریت و محدوده‌های میانگین از N-MORB و T-MORB برگرفته از داده‌های Sun & Macdonough (1989) را نشان می‌دهد.

در شکل ۵، الگوهای گابروی ایزوتروپ بهنجار شده با مقادیر گوشته اولیه، تهی‌شدگی آشکاری از عناصر Nb, Zr هستند در حالی که گابروی هورنبلندار فولیه که در روی زمین در بالای توالی گابروی ایزوتروپ رخنمون دارد، تنها تهی‌شدگی خفیفی از عنصر Ta دارد و الگوی آن نیز در فاصله قابل توجهی از الگوی گابرو ایزوتروپ جای گرفته است. الگوهای مرتبط با دایک‌های ورقه‌ای دیابازی و منفرد، میان الگوهای مربوط به گابرو ایزوتروپ و گابروی فولیه هورنبلندار قرار دارند و تمرکز عناصر در این الگوها به موازات و مشابه هم در ترازهایی میان ۱۶ تا ۲۵ است. غنی‌شدگی از عناصر Sr و Ba و تهی‌شدگی چشمگیر از عناصر Nb, Zr, Ta و Ti نیز دیده می‌شود. غنی‌شدگی ملایمی از عناصر LILE مانند Rb, Ba, Th در گابرو ایزوتروپ، دایک‌های ورقه‌ای دیابازی و دایک‌های دیابازی منفرد دیده می‌شود در حالی که در گابروی هورنبلندار فولیه، این تغییرات به آرامی از عنصر Th شروع و پس از یک تهی‌شدگی کم از عنصر Ta، با شیبی ملایم، مثبت و یکنواخت به سمت عناصر کمیاب سنگین ادامه می‌یابد.

بررسی نمودارهای عنکبوتی تجزیه‌های سنگ‌های بیان شده با مقادیر کندریت، نشان از الگوهایی تقریباً مسطح با تهی‌شدگی کم از عناصر Tm و Gd دارد. این الگوها در محدوده میانگین N-MORB جای می‌گیرند اما الگوهای مربوط به گابروی ایزوتروپ در ترازهای بسیار پایین‌تر از محدوده میانگین N-MORB در مرتبه ۲ تا ۳ واقع شده‌اند که می‌تواند نشانگر ویژگی‌های تهی‌شده منبع گوشته‌ای باشد. افزون‌بر این، تهی‌شدگی کمی در عناصر کمیاب سبک از La تا Sm نیز دیده می‌شود. این در حالی است که الگوی گابروی فولیه هورنبلندار در ترازهای بسیار بالاتر در مرتبه ۱۱ و در پیرامون T-MORB واقع شده و در دامنه‌ای گسترده از مرتبه ۶ تا ۲۰ قرار دارند که می‌تواند نشان از منبع ناهمگن (Heterogenous source) مولد ماگما/ماگماها داشته باشد. الگوهای مربوط به دایک‌های ورقه‌ای دیابازی و منفرد تقریباً خطی با شیب منفی و ملایم از عناصر LREE به سوی عناصر HREE است. این الگوها در مقایسه با الگوهای گابرو ایزوتروپ در ترازهای بالاتری قرار دارند و به محدوده میانگین N-MORB نزدیک‌تر هستند. قرارگیری این الگوها در ترازهای مختلف و بالا بودن نسبت LREE/HREE را می‌توان به منبع ناهمگن و تأثیر ترکیبات مرتبط با فرورانش در تحولات ماگماتیک این توالی نسبت داد. گابرو هورنبلندار در روی زمین در پی گابروی ایزوتروپ و در زیر کمپلکس دایک‌های دیابازی ورقه‌ای برونزد دارد اما قرارگیری الگوی آن در ترازهای بالاتر از الگوهای دایک‌های ورقه‌ای دیابازی نشان می‌دهد که فرایند تفریق ماگمایی به تنهایی معرف تحولات ماگمایی در محدوده مورد مطالعه نیست.

رخنمون هورنبلند گابرو در توالی پوسته‌ای افیولیت‌ها می‌تواند معرف گذر میان کمپلکس دایک‌های ورقه‌ای دیابازی در بالا و گابروهای ایزوتروپ در قاعده (Nicolas et al., 2008) و ذوب بخشی آب‌دار در قاعده کمپلکس دایک‌های ورقه‌ای دیابازی باشند (Bosch et al., 2004; Nicolas et al., 2008). به عبارتی دیگر در اثر ذوب بخشی آب‌دار در سقف حجره ماگمایی که به طور عمده در بخش ریشه‌ای کمپلکس دایک‌های دیابازی واقع هستند، مذابی با ویژگی‌های MORB می‌تواند تولید شود (Michael & Schilling, 1989; France et al., 2009; France et al., 2010).

بررسی الگوهای بهنجار شده تجزیه‌های مرتبط با کوارتز دیوریت-کوارتز مونوزودیوریت با مقادیر گوشته اولیه نشان از ویژگی‌های کاملاً متفاوت آنها با دیگر سنگ‌های توالی پوسته‌ای جنوب ده‌شیر دارد. این الگوها ویژگی‌های کاملاً مشابه با الگوهای سری‌های کلسیمی-قلیایی جزایر کماتی و شیب منفی و تندی دارند. غنی‌شدگی از عناصر LREE مانند Rb, Ba, Th, U و Sr و تهی‌شدگی از

Wood, 1980; Pearce, 1982; Shervais, 1982; Stern & Bloomer, 1992; Stern et al., 2006; Ishikawa et al., 2007; Tian et al., 2008; Juteau & Maury, 1999 & 2009). همچنین تهی‌شدگی منفی Eu در یک نمونه از پلاژیوگرانیت- ترونجمیت نشان از تفریق یا جدایش پلاژیوکلاز دارد (Kuzmichev et al., 2005).

۳- در مقایسه با ترکیب مورب عادی، در تعداد قابل توجهی از الگوها، غنی‌شدگی از عناصر سنگ دوست (لیتوفیل) بزرگ یون (LILE) مانند Rb و Th و تهی‌شدگی از عنصر Nb در بیشتر الگوها و عناصر Zr و Ti در برخی از آنها دیده می‌شود که از جمله ویژگی‌های آشکار ماگماتیسیم مرتبط با فرورانش یا افیولیت‌های تشکیل شده در محیط فرافروانش است (Dilek & Furnes 2009; Dilek et al., 2007; Dilek et al., 2003; Saccani & Phontiadis 2004; Beccaluva et al., 2004; Robertson, 2002; Shervais, 2001; Juteau & Maury, 1999 & 2009; Stern & Bloomer, 1992). غنی‌شدگی برخی از الگوهای عناصر U, Rb, Ba, Th و در مقایسه با عناصر HFSE و عناصر کمیاب سنگین می‌تواند نشانگر تأثیر ترکیبات برخاسته از صفحه فرورونده (Subduction components) و دخالت آنها در ذوب بخشی گوه گشته‌ای در بالای این صفحه باشد (Herbert et al., 2009; Tian et al., 2008; Stern et al., 2006; Elliott et al., 1997; Arculus 1994). تهی‌شدگی از عناصر HFSE، ناهمگونی در ترکیب سنگ منشأ و قرارگیری نمودارهای عنکبوتی در ترازهای با دامنه گسترده، مقایسه منشأ ماگمای سازنده توالی پوسته‌ای افیولیت تکنونیزه کهدوئیه را با ترکیب مورب‌ها با اشکال مواجه می‌کند.

## ۶- نقش ترکیبات فرورانش در تکوین ماگمای سازنده توالی پوسته‌ای

در مدلی نمادین، بسیار ساده و برگرفته از Stern & Bloomer (1992)، ارتباط تشکیل افیولیت با بازشدگی سریع در صفحه بالایی یک پهنه فروانش در حال تولد را نشان داده است (شکل ۶). در این مدل در یک پهنه فروانش در حال تولد، صفحه فرورونده با سست‌کره (آستوسفر) زیرین خود که بیشتر منشأ مورب دارد به سمت ژرفاها کشیده می‌شود. در این مرحله ممکن است در بالای صفحه فرورونده (Subducted slab)، کشیدگی سریع اتفاق بیفتد و فضای خالی در محدوده گوه گشته‌ای بالای صفحه تشکیل شود. به دلیل ویژگی‌های پلاستیک، سست‌کره زیر صفحه فرورونده می‌تواند به بالای صفحه و در محدوده فضای خالی بیان‌شده جریان یابد. در هنگام انجام فرایندهای یادشده و با ورود صفحه فرورونده به ژرفاها، کانی‌های آبدار، آب خود را از دست می‌دهند و شرایط برای تشکیل سیال‌های آبدار فراهم می‌شود که با تأثیر بر گوه گشته‌ای سبب پایین آمدن نقطه ذوب بخشی آن می‌شوند. با افزایش بیشتر ژرفای صفحه فرورونده، این صفحه نیز دچار ذوب می‌شود و یا در ژرفا ناپدید می‌شود. ذوب بخشی گوه گشته‌ای بالای صفحه فرورونده و تأثیر متفاوت سیال‌ها و یا مذاب، می‌تواند شرایط را برای تشکیل افیولیت‌های فرافروانش فراهم کند. به موازات فاصله گرفتن از جبهه فرورانش و حرکت به سمت کمان‌ها می‌توان تأثیر متفاوت اما بیشتر مشتقات فرورانش، شامل سیال‌ها و یا مواد مذاب را بر منشأ ماگما شاهد بود.

گدازه‌های بازالتی در پشته‌های میان اقیانوسی متأثر از ترکیب‌های برخاسته از صفحه فرورونده در مناطق فرورانش نیستند اما به موازات دور شدن از بازشدگی‌های میان اقیانوسی و به سوی حوضه‌های پشت کمان بر تأثیر مشتقات فرورانش اضافه می‌شود. از آنجا که این مشتقات ممکن است به صورت سیال‌ها و یا مذاب برگرفته از صفحه فرورونده بر گوه گشته‌ای عمل کنند، سؤالی که مطرح می‌شود این است که میزان تأثیر آنها بر منبع گوه‌گشته‌ای تهی‌شده و دخالت آنها در ذوب بخشی و تشکیل ماگما/ماگماهای سازنده توالی پوسته‌ای جنوب ده‌شیر چگونه بوده است؟ پاسخ به

فرافروانش است (Wood, 1980; Pearce, 1982; Shervais, 1982; Stern & Bloomer, 1992; Stern et al., 2006; Ishikawa et al., 2007; Tian et al., 2008; Juteau & Maury, 1999 & 2009). همچنین تهی‌شدگی منفی Eu در یک نمونه از پلاژیوگرانیت- ترونجمیت نشان از تفریق یا جدایش پلاژیوکلاز دارد (Kuzmichev et al., 2005).

بررسی الگوهای بهنجار شده تجزیه‌های مرتبط با گدازه بالشی و روانه صفحه‌ای با مقادیر گشته اولیه، الگوهایی تقریباً خطی از عناصر کمیاب متوسط به سوی عناصر کمیاب سنگین دارد. تهی‌شدگی کم از عناصر Ta و Nb در دو الگو و تهی‌شدگی آشکار از این عناصر در یکی از الگوها دیده می‌شود. غنی‌شدگی از عنصر U و Th قابل توجه است اما پراکندگی در عنصر Ba نمایان است. بررسی الگوهای بهنجار شده تجزیه‌های مرتبط با گدازه بالشی و روانه صفحه‌ای با مقادیر کندریت، نشان از الگوهایی خطی دارد که در مرتبه‌ای بین ۱۰ تا ۲۵ جای گرفته‌اند. در نمودارهای عنکبوتی، عناصر La تا Nd در مرز بالایی محدوده میانگین N-MORB واقع شده‌اند. در حالی که دیگر عناصر خاکی کمیاب متوسط تا سنگین در مرز پایینی محدوده میانگین N-MORB تا مرز پایینی محدوده میانگین T-MORB جای دارند. در یک جمع‌بندی کلی، نتایج حاصل از بررسی نمودارهای عنکبوتی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- الگوهای بهنجار شده از تجزیه‌های توالی پوسته‌ای افیولیت جنوب ده‌شیر در چهار دسته تمرکز یافته‌اند. الگوهای گابرو ایزوتروپ، پگماتیت گابرو و فرودباباز قطع‌کننده آنها پایین‌تر از محدوده میانگین N-MORB جای گرفته‌اند و تهی‌شدگی از عناصر خاکی کمیاب روشن در آنها دیده می‌شود. دسته دوم، دربردارنده الگوهای دایک‌های ورقه‌ای دیابازی و منفرد و یک نمونه از پگماتیت گابرو است که در مرز پایینی محدوده میانگین N-MORB و T-MORB واقع هستند و نسبت LREE/HREE در آنها بیشتر است. گروه سوم، دربردارنده الگوهای گابرو هورنبلنددار، گدازه بالشی و روانه صفحه‌ای است که در مرز بالای محدوده میانگین N-MORB و T-MORB جای دارند. این سه دسته تمرکزهای مختلفی از LREE دارند اما تمامی آنها دارای روندی کاملاً خطی از عناصر HREE هستند. دسته چهارم دربردارنده الگوهای کوارتزودیوریت- کوارتزومونودیوریت و پلاژیوگرانیت- ترونجمیت هستند که به‌رغم این‌که در ترازهای متفاوت قرار دارند اما نسبت LREE/HREE در آنها بسیار بالاتر از سه دسته پیشین است و شیب تند و منفی دارند. تفاوت در تمرکز عناصر در الگوهای بهنجار شده را می‌توان به ناهمگن بودن منبع سازنده ماگما/ماگماها نسبت داد. در مناطق فرورانش، به طور کلی منبع گوه‌گشته‌ای مولد ماگما را ترکیبی مشابه با گوه‌گشته تهی‌شده در مورب (Depleted mantle MORB) یا به اختصار (DMM) در نظر می‌گیرند (Caulfield et al., 2008). درجات متفاوت ذوب بخشی و تأثیر ترکیبات برگرفته از صفحه فرورونده سبب ایجاد ماگما/ماگماهای با درجات متفاوت از غنی‌شدگی عناصر خاکی کمیاب سبک می‌شود (Caulfield et al., 2008; Pearce et al., 2005).

۲- الگوهای بهنجار شده با مقادیر استاندارد کندریت از گابرو ایزوتروپ، پگماتیت گابرو و فرودباباز، افزون‌بر این‌که در ترازهایی بسیار پایین‌تر از N-MORB واقع‌اند، تهی‌شدگی از عناصر خاکی کمیاب سبک دارند اما به سمت عناصر خاکی کمیاب سنگین روند کاملاً خطی یافته‌اند. می‌توان گفت که روند خطی HREE در الگوهای بقیه تجزیه‌ها نیز حفظ شده است اما غنی‌شدگی‌های متفاوت از LREE نشان می‌دهند. روند خطی عناصر کمیاب سنگین در این الگوها، می‌تواند معرف منبع گوه‌گشته‌ای اسپینل‌دار نیز باشد که درجات متفاوتی از ذوب بخشی و غنی‌شدگی را تحمل کرده‌اند (Lin et al., 1989) که در افیولیت‌های نوع فرافروانش معمول است (Dilek and Furnes, 2009; Dilek, 2003). همان‌گونه که در بند ۱ بیان شد، تعداد قابل توجهی از الگوها در ترازهایی پایین‌تر از

پلاژیوگرنیت- ترونجمیت دارای بیشترین مقدار  $\text{SiO}_2$  است. به رغم رفتار خطی عناصر خاکی کمیاب در نمودارهای عنکبوتی سنگ‌های خروجی و مشابهت‌هایی که با الگوهای مورب دارند، مقدار  $\text{SiO}_2$  در این نمونه‌ها از ۵۰/۳٪ تا ۵۴/۲٪ متغیر است که به‌طور چشمگیری بیشتر از مقادیر آنها در مورب بوده (۴۷٪ تا ۵۱٪) و متمایل به سمت تولیت‌های جزایر کمانی است (Yunpeng & Bingquan, 2000). نسبت  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در کمپلکس دایک‌های ورقه‌ای دیابازی، منفرد و گابروها از روانه صفحه‌ای و گدازه بالشی بیشتر و در حوالی قلمروی MARA تمرکز یافته است. به‌طور کلی با کاهش میزان MgO در ماگما مقدار  $\text{Al}_2\text{O}_3$  نیز به دلیل تبلور و تفریق پلاژیوکلاز کاهش می‌یابد. همان‌گونه که بیان شد روند تغییر این عنصر در نمودار مربوط، نه تنها روند کاهشی ندارد بلکه از گابرو ایزوتروپ به سمت دایک‌های ورقه‌ای دیابازی روند افزایشی داشته و سپس با روند منفی ادامه یافته است. حتی با ادامه روند کاهشی در سنگ‌های خروجی، مقدار کلی این اکسید از ۴/۱۲٪ بیشتر است که بالاتر از مقدار این اکسید در مورب‌هاست (Hawkins & Melchior, 1985; Michael & Chase, 1987). گدازه‌های مورب‌ها دارای مقادیر آب بین ۰/۰۵٪ تا ۱/۳٪ هستند گرچه در مورب‌های عادی این مقادیر از ۰/۰۱٪ تا ۰/۰۴٪ درصد وزنی متغیر است (Dixon et al., 1998; Michael & Chase, 1987). گدازه‌های حوضه مرکزی لو در جنوب فیلیپین دارای مقادیر آب تا ۱/۲٪ وزنی هستند و مقدار دی‌اکسید کربن (۲۳۲-۹ ppm) آنها نیز بالاست (Tian et al., 2008). بالا بودن آب در مقادیر اکسیدهای اصلی نیز بازتاب داشته است به‌طوری که در مقایسه با مورب‌ها، برخی از گدازه‌ها در حوضه میانی لو که در فواصل دورتری از بازشدگی‌های اقیانوسی و نزدیک به مناطق پشت کمان هستند مقادیر بالاتری از  $\text{Al}_2\text{O}_3$  داشته‌اند (Tian et al., 2008). بالا رفتن آب در ماگمای بازالتی و یا گوشته در حین ذوب بخشی، سبب جلوگیری و یا تأخیر تبلور پلاژیوکلازها نیز می‌شود (Michael & Chase, 1987) و سبب می‌شود تا مقدار Al ماگما در کمان‌ها بالا رود. شاید به همین دلیل است که مقدار  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در نمونه‌های توالی پوسته‌ای جنوب ده‌شیر همانند گدازه‌های کمان‌ها در مقادیری بالاتر از مورب‌ها قرار دارند. نتایج تجزیه‌ها در نمودارهای شکل ۷ نشان می‌دهد که رفتار اکسیدهای اصلی نسبت به MgO، در نمودارهای دو تایی، به صورت خطوطی پهن با شیب‌های متغیر است. گرچه تفاوت‌هایی در پراکندگی نقاط دیده می‌شود، اما بیشتر نقاط در فصل مشترک بین قلمروهای مربوط به مورب و تراف ماریان واقع شده‌اند. در مورد نسبت‌های MgO،  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{TiO}_2$ ، تجمع نقاط به‌طور عمده در پیرامون قلمروی MARA متمرکز است. از جمله ویژگی‌های ژئوشیمیایی شاخص دیگری که برای تشخیص گدازه‌های کمان‌های مرتبط با فرورانش فرض است، بالا بودن مواد فرار و غنی‌شدگی گدازه‌ها از عناصر LILE نسبت به HFSE است که توسط ترکیبات مرتبط با فرورانش (شامل سیال‌های آب‌دار و یا مواد مذاب حاصل از ذوب بخشی صفحه فرورونده (Subducting slab) وارد گوه گوشته‌ای (Mantle wedge) در بالای صفحه می‌شوند (Miller et al., 1994; Rayan et al., 1995; Turner & Hawkesworth, 1997; Turner et al., 1997). بدیهی است که به دلیل گوناگونی فرایندها در مناطق فرورانش، عناصر سازگار ممکن است کاربرد مناسبی در تحلیل‌ها نداشته باشند، اما در راستای شناسایی تأثیر ترکیبات مرتبط با فرورانش در تکون ماگما/ماگماهای سازنده، به ویژه سیال‌ها، از نمودارهای عنکبوتی که در آنها عناصر کمیاب سازگار کاربرد دارند استفاده شد. این نمودارها، به ترتیب افزایش ناسازگاری عناصر از چپ به راست چیدمان شده (شکل ۸) و با مقادیر N-MORB پیشنهادی توسط Sun & MacDonough (1989) بهنجار شده‌اند. همان‌گونه که دیده می‌شود، تمرکز LILE بیشتر از LREE و تمرکز آنها نیز بیشتر از HFSE است. تمرکز این گونه از عناصر کمیاب، به‌نحو گسترده‌ای به نحوه تأثیر سیال‌ها (fluids) و یا مواد مذاب ناشی از ذوب بخشی صفحه فرورونده (Subducting slab) بر گوه

این سؤال با مقایسه رفتار اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و کمیاب محدوده مورد مطالعه با ویژگی‌های ژئوشیمیایی مراکز گسترش اقیانوسی مانند اقیانوس هند و مناطق پشت کمان مانند تراف ماریان امکان‌پذیر است.

اگر چه به نظر می‌رسد که فرایندهای تأثیر گذار در ماگماتیسیم مناطق پشت کمان (Back arcs)، مشابه تشکیل بازالت‌ها در حوضه‌های اقیانوسی است (Taylor & Martinez, 2003) اما فرایندهای تأثیر گذار در ماگماتیسیم پشت کمان، متأثر از پدیده فرورانش هستند که سبب می‌شود تا ماگماتیسیم این مناطق تنوع ژئوشیمیایی بیشتری نسبت به حوضه‌های اقیانوسی داشته باشند. بنابراین شاید نتایج گرفت که به موازات دور شدن از محور پشته‌های میان اقیانوسی و نزدیک شدن به مناطق فرورانش بر گوناگونی ترکیبی سنگ‌ها اضافه شود. بازشدگی در مناطق پشت کمان، ارتباط نزدیکی با توسعه کمان‌های آتشفشانی و تراف‌ها (Trenches) در مناطق مجاور دارد. بنابراین ماگماتیسیم در این مناطق به‌ناچار متأثر از مشتقات (Component) برگرفته از صفحه فرورونده (Subducting slab) است که با آزاد شدن آب کانی‌های آب‌دار سازنده این صفحه، بخش اصلی از ترکیبات مرتبط با فرورانش (Subduction omponents) شکل می‌گیرند. بررسی‌های ژئوشیمیایی نشان داده است که نحوه انتشار آب و دخالت آن در ذوب بخشی گوشته به‌طور کلی در پشته‌های میان اقیانوسی و حوضه‌های پشت کمان متفاوت است (Taylor & Martinez, 2003; Kelly et al., 2006; Langmuir et al., 2006; Tian et al., 2008).

حوضه لو (Lau basin) مثالی کلاسیک از یک حوضه پشت کمان است و مانند دیگر حوضه‌های پشت کمان در باختر پاسیفیک این حوضه نیز ویژگی‌های ژئوشیمیایی مشابه پشته‌های میان اقیانوسی را به خوبی نشان می‌دهد و همچنین در کنار یک کمان آتشفشانی حاشیه‌ای همگرا یا کمان تونگا واقع است. در بررسی‌های اولیه ژئوشیمیایی، فرض بر تشکیل گدازه‌های این حوضه در شرایطی مشابه با مورب‌ها بود (Hawkins, 1976) اما مطالعات بعدی نشان داد که گدازه‌های این حوضه افزون بر ویژگی‌های ژئوشیمیایی مشابه مورب‌ها، ویژگی‌های ژئوشیمیایی تولیتی کمانی دارند و غنی از مواد فرار و عناصر سنگ‌دوست بزرگ یون (LILE) در مقایسه با عناصر کمیاب و خاکی سنگین هستند (Hawkins & Allen, 1994). همچنین، بررسی ژئوشیمیایی شیشه‌های آتشفشانی لاروب شده (Dreged) نشان از افزایش نقش ترکیبات مرتبط با فرورانش در تحولات ماگماتی این ناحیه به‌ویژه به سمت حوضه پشت کمان لو داشته است (Pearce & Peat 1995; Tian et al., 2008). همان‌گونه که بیان شد، به‌منظور درک بهتر نقش ترکیبات مرتبط با فرورانش در منشأ ماگما/ماگماهای سازنده توالی پوسته‌ای جنوب ده‌شیر، باید رفتار اکسیدهای اصلی و برخی از عناصر فرعی و کمیاب متأثر از ترکیبات فرورانش را نیز بررسی کرد. در این راستا و در شکل ۷ موقعیت مقادیر MgO به اکسیدهای اصلی نشان داده شده است. از آنجا که ترکیب شیمیایی بازالت‌های تراف ماریان را به عنوان شاخصی از یک حوضه پشت کمانی در نظر می‌گیرند (Sinton & Fryer, 1987)، بنابراین قلمرو این حوضه با نشانه MARA در نمودارهای شکل ۷ رسم شدند (بر پایه داده‌های (Hawkins & Melchior (1985)). در این نمودارها، برای رسم قلمروی مورب‌ها از داده‌های ژئوشیمیایی (Hochstaedter et al. (1990) و منابع آن استفاده شده است. در شکل ۷ تنها در نمودار نسبت MgO به  $\text{SiO}_2$  تمامی داده‌ها رسم شدند اما در دیگر نمودارها، به‌منظور مقایسه و درک بهتر نقش مشتقات فرورانش تنها از تجزیه‌های شیمیایی مرتبط با سنگ‌های بازیک- حدواسط استفاده شده است. بر پایه این نتایج، تغییرات MgO در محدوده مورد مطالعه از ۲/۵٪ تا ۱۲/۸٪ متغیر است و این نسبت در مورد گابرو ایزوتروپ از ۱/۰۵٪ تا ۱۲/۸٪ در تغییر است که ممکن است نشانه ذوب بخشی بالای منبع گوشته‌ای و یا ذوب یک منبع گوشته‌ای تهی‌شده با منیزیم بالا بوده باشد (Juteau & Maury, 1999; Miyashiro, 1973).

مقدار عناصر برخاسته از صفحه فرورونده که به منبع گوشته‌ای اضافه شده‌اند را برآورد کرد. در این رابطه مقادیر نسبت‌های عناصر بیان شده در مورب هند، به عنوان شاخصی برای تشخیص افیولیت‌های نوع مورب و نسبت‌های همین عناصر در کمان تونگا (شکل ۱۰)، به عنوان معیاری برای تشخیص افیولیت‌های نوع SSZ در نظر گرفته شدند (Pearce et al., 2005; Pearce & Peate, 1995).

در شکل ۱۰، خطوط موازی مورب هند معرف رخدادهایی چون آمیختگی ماگما در حجره ماگمایی، ذوب دینامیک و خروج مواد مذاب است که به طور طبیعی در مورب‌ها روی می‌دهد. درصد‌های نوشته شده در کنار این خطوط نشان از درصد مشارکت عناصر برخاسته از صفحه فرورونده دارد. خط عمودی SZ نیز معرف افزایش مشارکت ترکیبات فرورانش از محیط مورب (مانند اقیانوس هند) به سوی محیط فرورانش (مانند کمان تونگا) است. در شکل ۱۰ و در نمودار Nb/Yb به Th/Yb غنی‌شدگی بیشتر عنصر Th نسبت به Nb دیده می‌شود. میزان تقریبی مشارکت عنصر Th برخاسته از صفحه فرورونده برای بیشتر تجزیه‌ها بین ۹۰٪ تا ۵۰٪ بوده و در برخی از دایک‌های دیابازی منفرد این مشارکت به بیش از ۹۰٪ هم رسیده است و تجمع کلی نقطه‌ها در محدوده قلمرو کمان تونگا است. در نمودار نسبت Th/Yb به Ba/Yb، به دلیل تحرک بیشتر عنصر Ba میزان غنی‌شدگی آن بسیار بیشتر از Th است. با توجه به آن چه که در زمینه رفتار متفاوت این دو عنصر در شرایط دمایی متفاوت بیان شد، می‌توان به این نتیجه رسید که نقش سیال‌های آب‌دار در منشأ ماگما/ماگماهای مولد توالی پوسته‌ای جنوب ده‌شیر بیش از مذاب‌های برخاسته از صفحه فرورونده بوده است. میزان مشارکت عنصر Ba برخاسته از صفحه فرورونده از حدود ۳۰٪ در روانه صفحه‌ای، گدازه بالشی و دایک ورقه‌ای دیابازی از ۵۰٪ تا ۹۰٪ در دیگر تجزیه‌ها متغیر است. در نمودار نسبت Nb/Yb به Ba/Yb عنصر Ba همچنان غنی‌شدگی بیشتر در مقایسه با عنصر Nb را نشان می‌دهند.

با استفاده از این نمودارها می‌توان دریافت که با افزایش تحرک عناصر به ترتیب  $Ba > Th > Nb > Yb$ ، میزان مشارکت آنها نیز در منشأ توالی پوسته‌ای مجموعه افیولیتی جنوب ده‌شیر افزایش یافته است. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که مشارکت عناصر کیمیا و خاکی و در مواردی غنی‌شدگی آنها در سنگ‌های سازنده توالی پوسته‌ای افیولیت جنوب ده‌شیر در اثر تأثیر سیال‌های برخاسته از صفحه فرورونده بر گوشته‌ای تهی‌شده بوده و نقش مواد مذاب ناشی از ذوب بخشی رسوبات بالای این صفحه ناچیز بوده است.

بر پایه پژوهش (Shervais, 2001)، افیولیت‌های نوع فرافرورانش، به‌ویژه انواع مرتبط با پیشانی کمان در پنج مرحله (۱) تولد (Birth) (۲) جوانی (Youth) (۳) بلوغ (Maturity) (۴) مرگ (Death) (۵) احیا (Resurrection) شکل می‌گیرند. در مرحله تولد، افیولیت‌ها در بالای پهنه فرورانش و در مراحل اولیه تشکیل این پهنه شکل می‌گیرند. در این مرحله گدازه‌های تولیتی کمانی (Arc tholeiite)، گابروهای لایه‌ای و کمپلکس دایک‌های ورقه‌ای دیابازی از ذوب بخشی سست‌کره تشکیل می‌شوند. در مرحله جوانی، سست‌کره دیرگداز (Refractory Asthenosphere) دچار ذوب بخشی و ادخال‌های وریلیتی تشکیل می‌شوند. مرحله بلوغ با فوران آتشفشانی با ویژگی‌های کمانی، ادخال‌های کوآرتز‌دوبوریتی و حتی گدازه‌های سیلیسی همراه است. در مرحله مرگ، فرایند گسترش (Spreading) اقیانوس و فعالیت آتشفشانی مرتبط، به‌طور ناگهانی متوقف می‌شود. این مرحله با تشکیل دایک‌ها و گدازه‌های با ویژگی‌های اقیانوسی همراهند که سری‌های پیشین را قطع کرده‌اند و یا بر روی آنها نهشته شده‌اند. مرحله احیا با جایگیری افیولیت در درون حاشیه قاره‌ای غیرفعال و یا فرورانش آن همراه بوده است و با ادامه فرورانش، با بالاآمدگی افزایشی (Accretionary uplift) ادامه خواهد یافت. مراحل تولد، جوانی و بلوغ ممکن است در زمان‌های مختلفی روی دهند و هر مرحله ممکن است با مرحله پیشین دارای همپوشانی باشد. شناخت این مراحل نشان می‌دهد که تشکیل افیولیت‌ها در پهنه‌های

گوشته‌ای بستگی دارد. بررسی الگوهای به‌نچار شده از عناصر بیان‌شده مرتبط با توالی پوسته‌ای با مقادیر N-MORB، دارای شیب منفی از LREEها به سوی HREEها و نسبت بالای LREE/HREE است. تهی‌شدگی‌های قابل توجه کم از عناصر Nb, Ta, Zr و Ti و غنی‌شدگی از عناصر Sr, Ba, K, Rb (شکل ۸)، ضمن تأیید تأثیر ترکیبات برخاسته از صفحه فرورونده، نشان از تأیید تشکیل افیولیت جنوب ده‌شیر در یک محیط فرافرورانش (SSZ) نیز دارد (Sun & McDonough, 1989; McCulloch & Gamble, 1991).

در شکل ۹، نمودارهای دوگانه از نسبت La به عناصر Sr, Ba, Rb, Th و K نشان داده شده است. در این نمودارها، قلمروهای مربوط به مورب هند برگرفته از داده‌های (Mahoney et al., 2002), Rehkamper & Hofman (1997) و میانگین مورب عادی از متوسط داده‌های (Macdougall & Lugmair, 1986) و (Marty & Zimmermann, 1999) برگرفته شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، این عناصر غنی‌شدگی‌های متفاوت شده و کیمیا مقادیر بالاتری نسبت به مورب‌ها دارند. در نتیجه با توجه به نمودارهای یادشده می‌توان گفت که بیشتر تجزیه‌های توالی پوسته‌ای افیولیت جنوب ده‌شیر دارای نسبت‌های K/La, Sr/La, Ba/La, Rb/La و Th/La بالاتری نسبت به مورب‌ها دارند. در برابر بیشتر نمونه‌ها دارای مقادیر پایین‌تر Nb در مقایسه با La هستند و نسبت Nb/La در آنها پایین است. افزون بر این، ارتباط خطی خوبی بین عناصر متحرکی همچون Sr, Ba با عنصر کم تحرکی مانند La دیده می‌شود. عناصر متحرکی مانند Rb و K دارای پراکندگی نسبت به عنصر La هستند که شاید دلیل آن دگرسانی‌های بعدی و یا تأثیر متفاوت سیال‌ها در دماهای متفاوت باشد. ارتباط خطی به نسبت مشخصی بین نسبت عنصر کم تحرکی همچون Nb و عنصر متحرک در سیال‌های دمای بالا مانند Th دیده می‌شود.

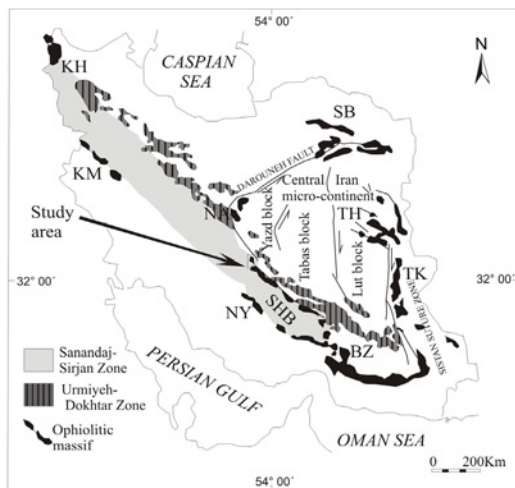
## ۷- نقش سیال‌ها در تکوین ماگما/ماگماهای توالی پوسته‌ای افیولیت جنوب ده‌شیر

با توجه به رفتار اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و متحرک می‌توان به این نتیجه رسید که تنوع ترکیبی در توالی پوسته‌ای افیولیت جنوب ده‌شیر متأثر از ترکیبات برخاسته از صفحه فرورونده (Subducted slab) و دخالت آنها در تکوین ماگما/ماگماهای توالی پوسته‌ای این ناحیه بوده است. در این مرحله سؤال باقیمانده، کیفیت تأثیر این ترکیبات است. بدین معنی که آیا تأثیر آنها از راه انتقال سیال‌های آب‌دار برخاسته از صفحه فرورونده بوده یا این که از راه مواد مذاب ناشی از ذوب بخشی صفحه فرورونده بوده است؟ در این رابطه نمودارهایی که در آنها از نسبت‌های عناصر ناسازگار مانند Ba, Th و Nb استفاده شده است مفید هستند. شاید بتوان گفت که این عناصر در بازالت‌های اقیانوسی که مربوط به فرورانش نیستند، رفتار مشابهی را در جریان ذوب بخشی و یا تفریق بلورین نشان می‌دهند (Niu & Batiza, 1997). همچنین، این عناصر طی فرورانش از یکدیگر تفکیک می‌شوند چرا که قابلیت انحلال آنها در سیال‌های آب‌دار متفاوت است. بر پایه داده‌های انتشار یافته از مناطق فرورانش (Keppler, 1996; You et al., 1996; Hermann, 2002)، عنصر Ba، می‌تواند در قلمروهای حرارتی وسیعی در پهنه‌های فرورانش متحرک باشد و همراه با سیال‌های آب‌دار انتشار یابد. Th در سیال‌های دمای پایین کم تحرک و یا نامتحرک است، اما در دمای بالا که رسوبات بالای صفحه فرورونده و یا گوه گوشته‌ای دچار ذوب بخشی می‌شوند، میل ترکیبی دارد. Nb بیشتر نامتحرک است (Tian et al., 2008). بنابراین از نسبت‌های عناصری همچون Ba/Th و Th/Nb می‌توان برای تشخیص نحوه تأثیر سیال‌ها در ژنر ماگما/ماگماهای توالی پوسته‌ای افیولیت تک‌تونیزه جنوب ده‌شیر استفاده کرد.

با توجه به رفتار عناصر Ba, Th و Nb در مناطق فرورانش و تحرک نداشتن عنصر Yb در سیال‌ها و با استفاده از نسبت‌های عناصر Ba/Yb, Nb/Yb و Th/Yb می‌توان

کوارتز دیوریت- کوارتز موزود یوریت و ادخال‌های ورلیتی و همچنین ویژگی‌های ژئوشیمیایی بیان شده، نشان از ذوب بخشی با درجات متفاوت منبع گوشته‌ای ناهمگن و تأثیر متفاوت سیال‌های آب‌دار برخاسته از صفحه فرورونده بر منبع گوشته‌ای بیان شده دارد که حاصل آن به صورت تپی شدگی و غنی‌شدگی عناصر در الگوهای بهنجار شده نمایان شده است. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که افیولیت ده شیر مراحل مختلف تولد، جوانی و بلوغ را به خوبی طی کرده و از نوع افیولیت‌های بالغ است. به نظر می‌رسد که افیولیت جنوب ده شیر، در موقعیت تکنونو ماگمایی متمایل به پیشانی کمان اما، با فاصله اندک از لبه آن تشکیل شده است.

- با توجه به رخنمون بقایای افیولیتی دگرگون شده در این کمربند، احتمالاً می‌رسد که افیولیت جنوب ده شیر در محل فرورانش بخشی از یک قطعه اقیانوسی دیرین به زیر بخشی دیگر و در فاصله اندکی از لبه کمان (نه البته لزوماً پشت کمان) تشکیل شده است که با سناریوی فرورانش عمومی و کلی نوتیس، طی کرتاسه بالایی قابل توجیه است. بدیهی است که هدف از این پژوهش، تعریف یک مدل ژئودینامیکی نیست. نگارندگان بر این باورند که ارائه چنین مدلی، نیازمند داده‌های سنی دیرینه‌شناسی و ایزوتوپی از رخنمون‌های افیولیتی در کمربند شهر بابک- ده شیر، مناطق دگرگونی باختر- جنوب باختری این کمربند، توده‌های نیمه ژرف، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و حتی گرانیت شیرکوه در خاور این ناحیه بوده است و برداشت سامان‌مند اما صحیح باید مبنای هر نوع بررسی باشد. متأسفانه در سال‌های اخیر و در پاره‌ای از مطالعات انجام شده در مناطق افیولیتی ایران توسط دانشجویان جوان، این مهم مد نظر قرار نگرفته است و گاه رخنمون‌هایی از سری‌های فرا- افیولیتی، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و حتی جوان تر به عنوان وابسته‌های افیولیتی در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱- پراکنندگی مجموعه‌ها و کمپلکس‌های افیولیتی ایران با استفاده از داده‌های نقشه ماگماتیک ایران (Emami et al., 1993) و واحدهای مهم ساختاری- زمین‌ساختی ایران مرکزی (Ghasemi & Talbot, 2006) نشان داده شده است. حروف معرف عبارتند از: KH افیولیت خوی، KM افیولیت کرمانشاه، NA افیولیت ناین، SHB افیولیت شهر بابک، NY افیولیت نیریز، BZ افیولیت بزمان، SB افیولیت سبزوار، TK افیولیت چهل کوره، TH افیولیت تربت حیدریه.

فرا فرورانش، یک حادثه اتفاقی نیست بلکه پیامد مجموعه‌ای از حوادث در این محیط زمین‌ساختی است. با توجه به رخنمون ادخال‌های ورلیتی، آپوفیزهای کوارتز دیوریت- کوارتز موزود یوریت آمفیبول‌دار و ویژگی‌های ژئوشیمیایی قابل مقایسه با مناطق فرورانش، می‌توان انتظار داشت که افیولیت جنوب ده شیر، در یک سامانه فرا فرورانش، در پیشانی کمان با فاصله قابل توجهی از لبه آن تشکیل شده، مراحل تولد و جوانی را به خوبی طی کرده و از نوع افیولیت‌های بالغ است.

## ۸- نتیجه‌گیری

- توالی پوخته‌ای افیولیت تکنونیزه در جنوب ده شیر دارای گوناگونی ترکیبی است. بررسی‌های ژئوشیمیایی نشان از ویژگی‌های فرا فرورانش آنها را دارد. تپی شدگی از عناصر Ti, Nb, Zr نیز در تعداد قابل توجهی از تجزیه‌ها نشان دهنده این نتیجه‌گیری است. - بررسی نمودارهای عنکبوتی دلالت بر تمرکز عناصر کمیاب و فرعی در ترازهای متفاوت دارد که نشان دهنده منبع گوشته‌ای ناهمگن مولد ماگما/ماگماهای توالی پوخته‌ای محدوده مورد مطالعه است. منبع گوشته‌ای یادشده، تپی شده بوده که متحمل درجات متفاوت ذوب بخشی شده است و سیال‌های آب‌دار نقشی اساسی در غنی‌شدگی آن از LREEها داشته‌اند.

- بررسی دقیق نمودارهای عنکبوتی نشان می‌دهد که الگوها تمایل به تمرکز در ۴ تراز و یا محدوده مختلف دارند. گابرو و ایزوتروپ، پگماتیت گابرو و دایک فرودبابازی قطع‌کننده آنها در ترازهایی بسیار پایین‌تر از N-MORB واقع هستند که می‌تواند نشان از یک منبع گوشته‌ای تپی شده با مقادیر بالای MgO باشد. الگوهای دایک‌های ورق‌آیی دیابازی و منفرد، در مرز پایینی محدوده میانگین N-MORB و حتی پایین‌تر از آن قرار دارند. گابرو فولیه هورنبلنددار، گدازه بالشی و روانه صفحه‌ای در مرز بالای محدوده میانگین N-MORB با تمایل به سمت محدوده میانگین T-MORB واقع و در الگوهای بهنجار شده با کندریت، تمایل خطی دارند. پلاژیوگرانیت- ترونجمیت و کوارتز دیوریت- کوارتز موزود یوریت دارای غنی‌شدگی از عناصر کمیاب روشن و نسبت بالای HREEها/ LREEها بوده‌اند و شیب تند و منفی نشان می‌دهند.

- در الگوهای بهنجار شده با کندریت از گابرو ایزوتروپ، پگماتیت گابرو و دایک دیابازی قطع‌کننده آنها، تپی شدگی کم از عناصر LREE دیده می‌شود و به سمت عناصر HREE این روند خطی است که می‌تواند معرف یک منبع گوشته‌ای اسپینل‌دار باشد که درجات متفاوتی از غنی‌شدگی ناشی از تأثیر سیال‌های برخاسته از صفحه فرورونده را تحمل کرده‌اند.

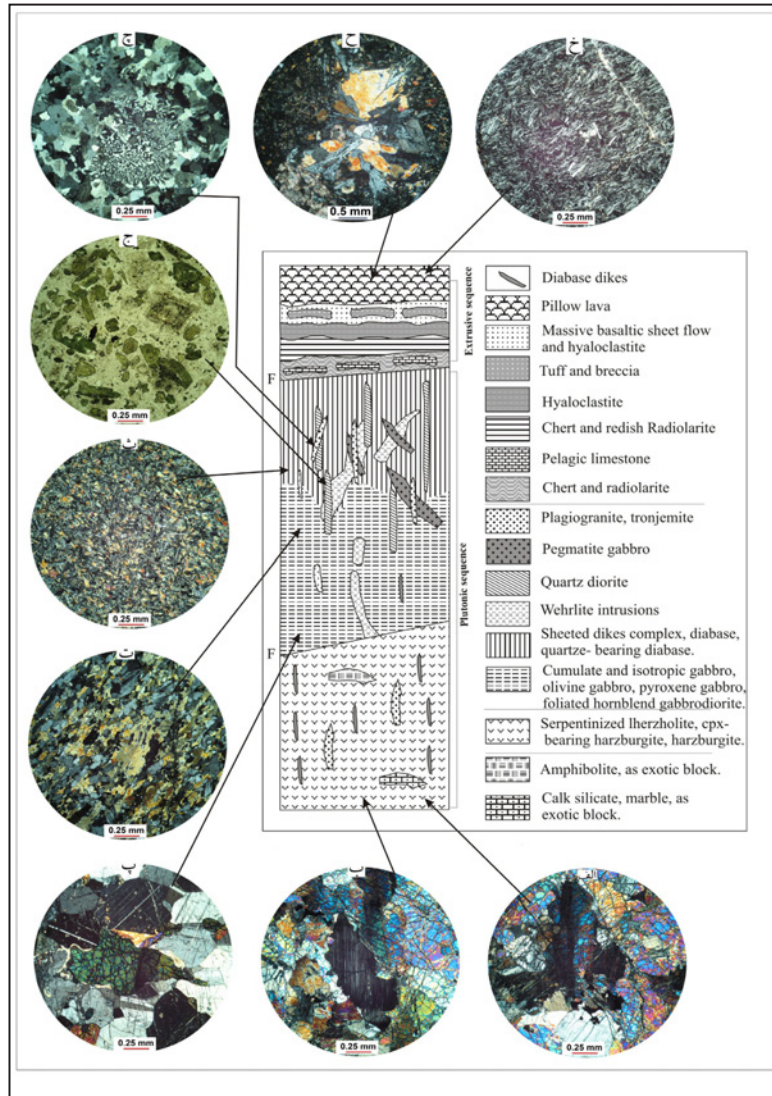
- نمودارهای مختلف تکنونو ماگمایی و چند عنصری نشان از ویژگی‌های ژئوشیمیایی کمانی در بیشتر تجزیه‌ها و ویژگی‌های ژئوشیمیایی قابل مقایسه با مورب‌ها در برخی از تجزیه‌ها دارد. گوناگونی این چنین از جمله ویژگی‌های آشکار افیولیت‌های سامانه‌های فرا فرورانش است.

- روند تفریقی کلسیمی- قلیایی و ویژگی‌های تولیتی- کلسیمی- قلیایی در تجزیه‌ها مشهود است.

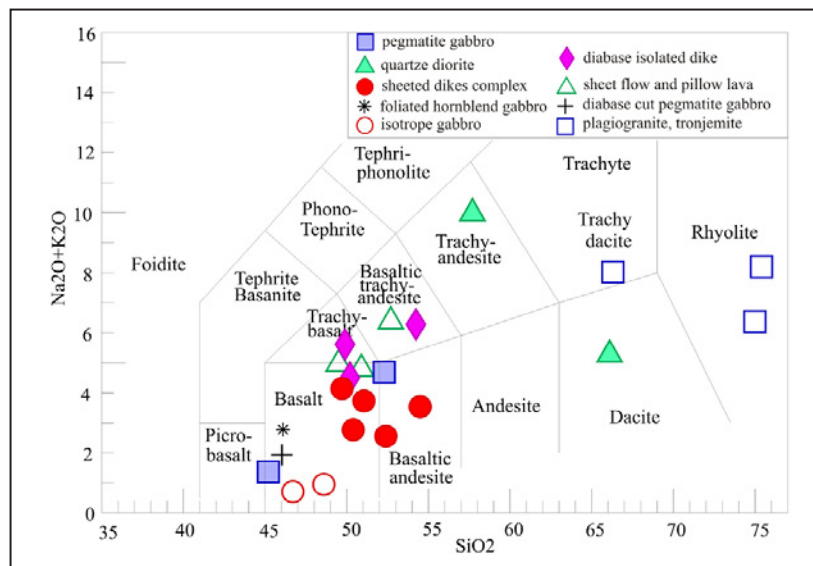
- بررسی رفتارهای عناصری چون Ba, Th, Nb و Yb و مقایسه نسبت‌های آنها نشان از تأثیر متفاوت ترکیبات مرتبط با فرورانش (Subduction components) در منشأ ماگما/ماگماهای سازنده توالی پوخته‌ای افیولیت جنوب ده شیر دارد که در میان آنها، نقش سیال‌های آب‌دار برخاسته از صفحه فرورونده به مراتب بیشتر از نقش مواد مذاب ناشی از ذوب بخشی رسوبات روئی صفحه یادشده است.

- مقایسه اکسیدهای اصلی، عناصر کمیاب ناسازگار و عناصر فرعی این محدوده با ترکیبات برخاسته از صفحه فرورونده در مناطق فرورانش، نشان می‌دهد که ماگما/ماگماهای سازنده توالی پوخته‌ای افیولیت جنوب ده شیر از مورب فاصله می‌گیرند و تمایل کمانی دارند.

- ویژگی‌های تولیتی تا کلسیمی- قلیایی، رخنمون توده‌های نفوذی نیمه ژرف از نوع

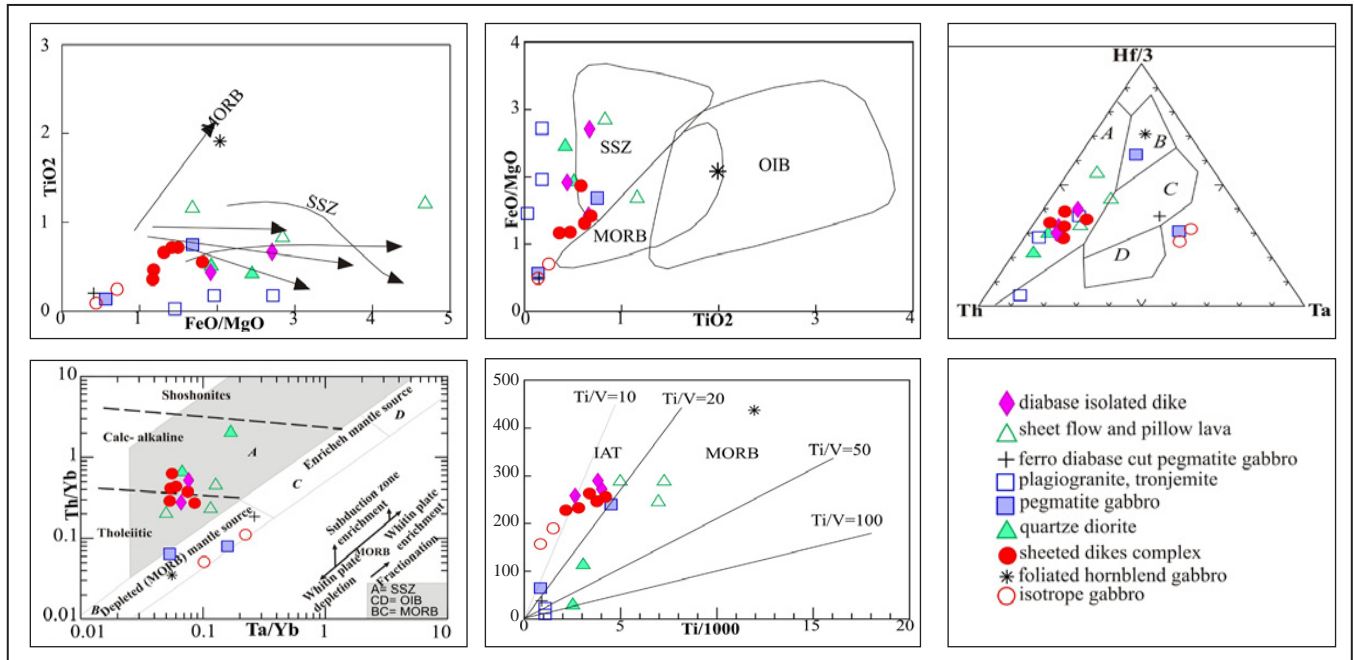


شکل ۲- نگاشت (لوگ) نمادین از مجموعه افیولیتی تکنونیزه کهدوئیه و واحدهای مختلف. تصاویر الف تا خ نیز تعدادی از عکس‌های میکروسکوپی انتخابی مرتبط با واحدهای این مجموعه افیولیتی است.

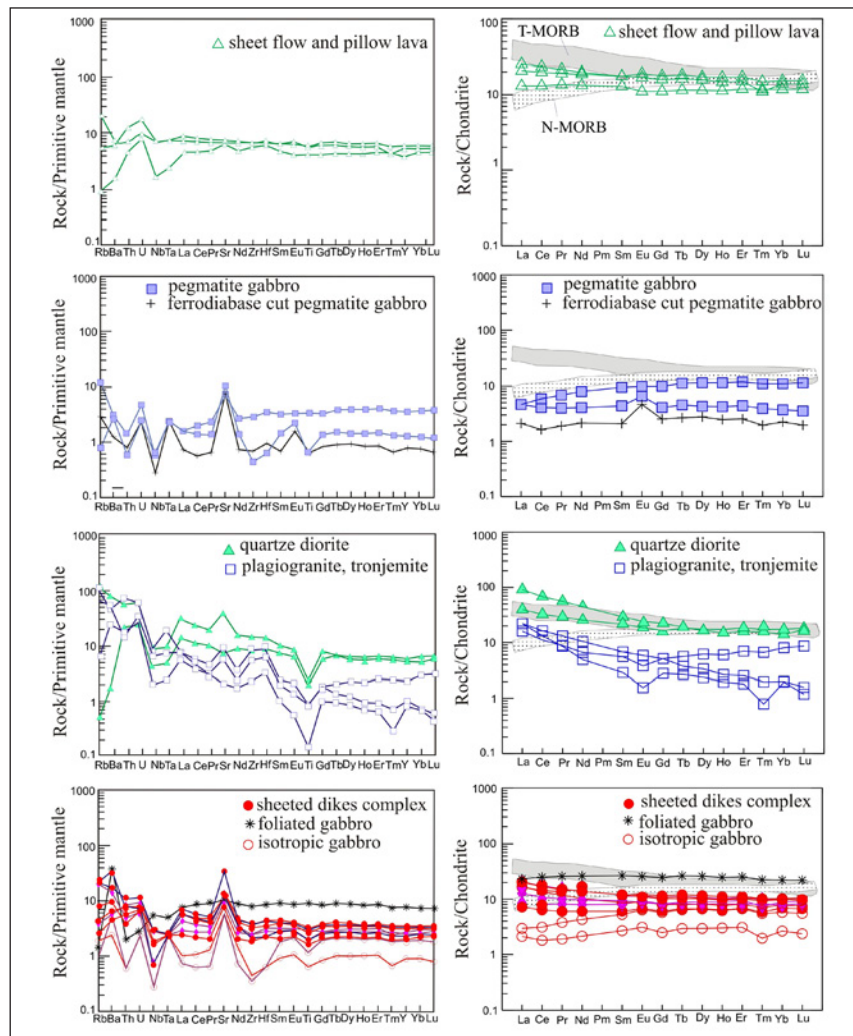


شکل ۳- موقعیت نمونه‌های محدوده مورد مطالعه بر روی نمودار نام گذاری (Le Bas et al. (1986) نشان داده شده‌اند.

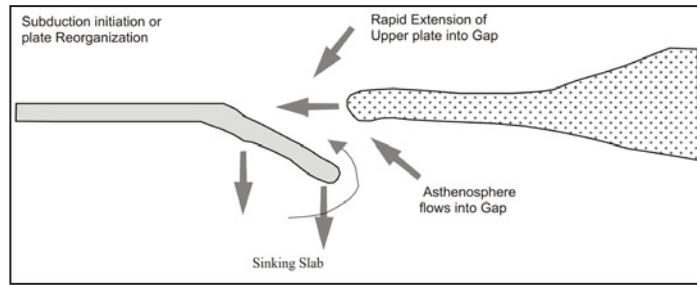




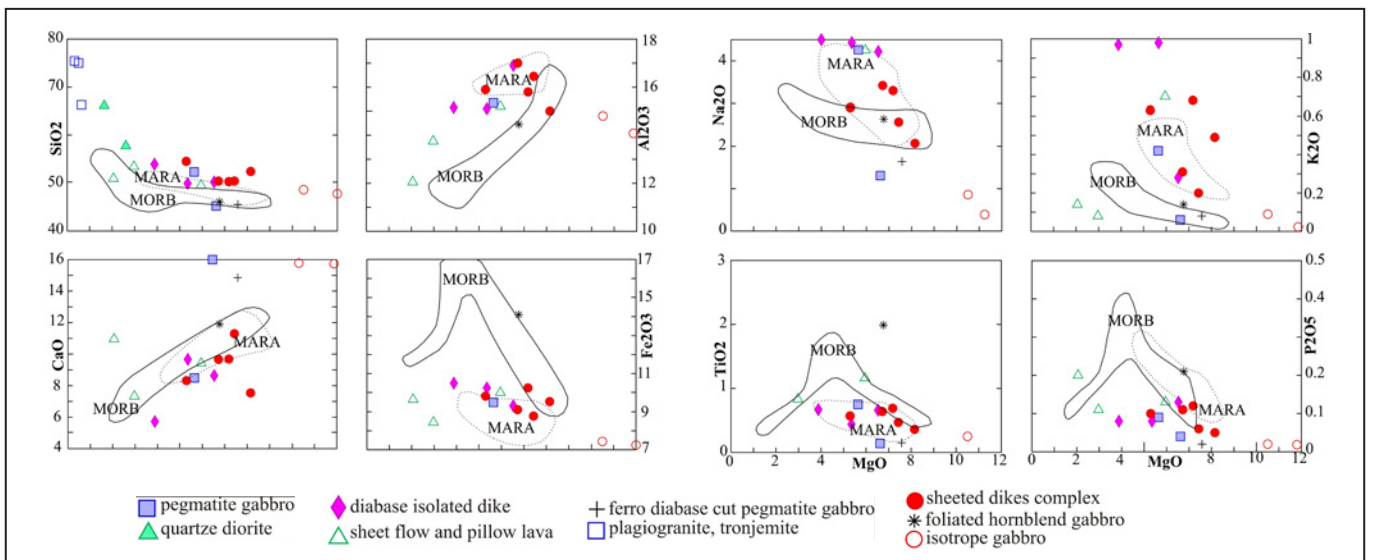
شکل ۴- نمودارهای انتخابی پیشنهادی توسط Pearce (2003) و موقعیت تجزیه‌های توالی پوسته‌ای جنوب ده شیر.



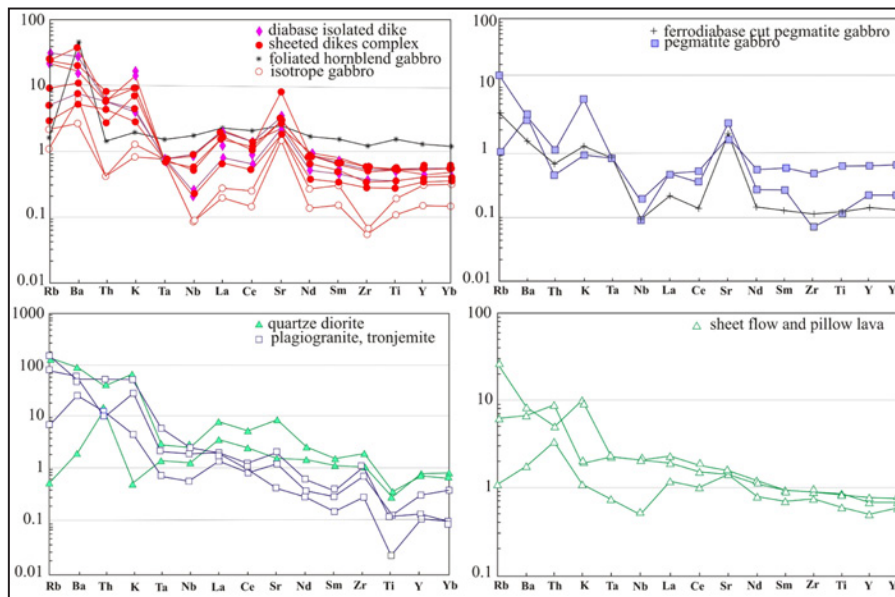
شکل ۵- نمودارهای عنکبوتی به‌نچار شده با مقادیر استاندارد گوشته اولیه و کندریت بر اساس داده‌های Sun & Macdonough (1989). محدوده‌های میانگین N-MORB و T-MORB نیز از داده‌های منبع یاد شده برگرفته شده است.



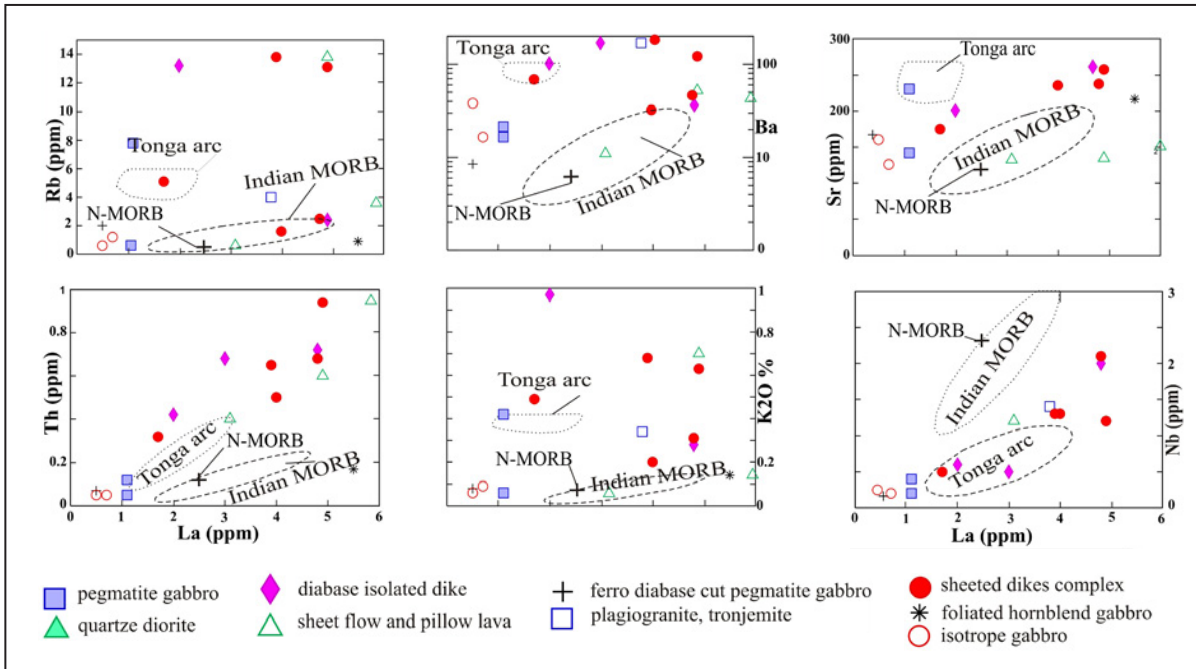
شکل ۶- مدل نمادین و برگرفته از Stern & Bloomer (1992)، ارتباط تشکیل افولیت با بازشدگی سریع در صفحه بالایی یک زون فروانش در شرف تولد را نشان داده است. توضیح بیشتر در متن مقاله.



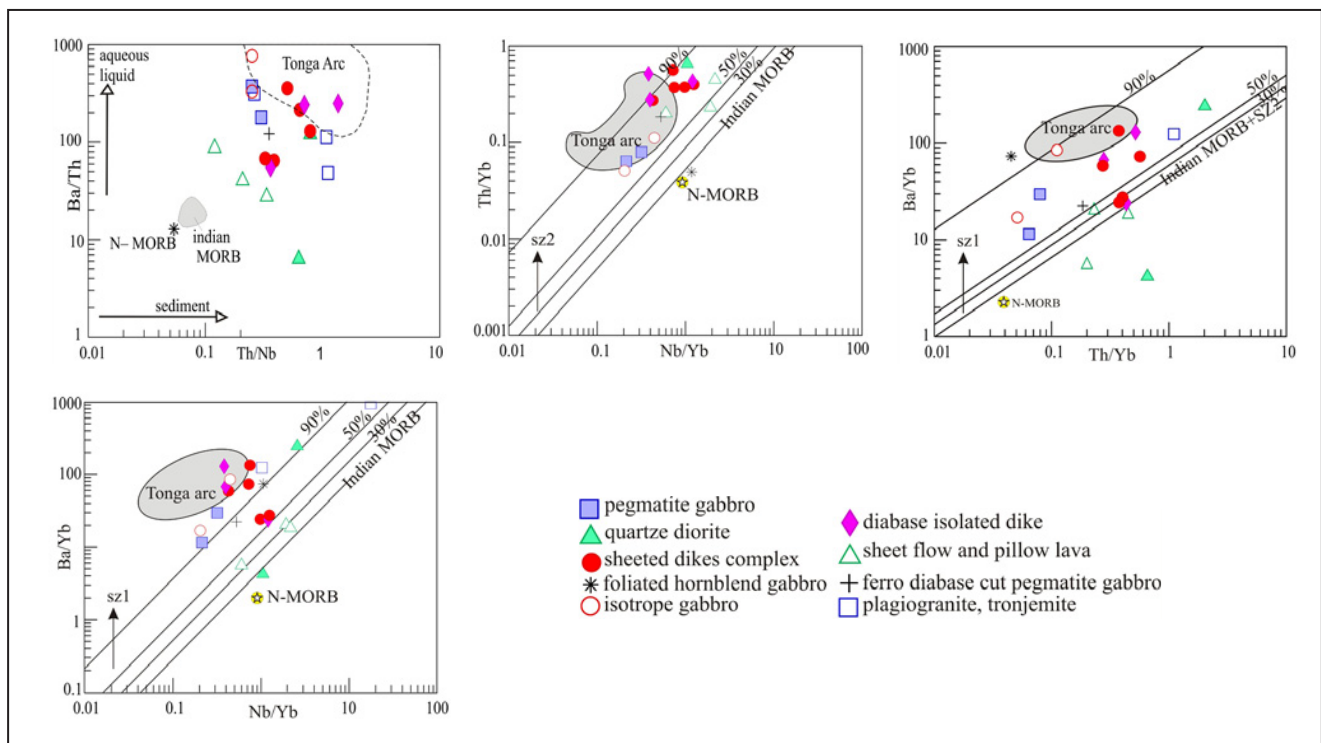
شکل ۷- موقعیت اکسیدهای اصلی نسبت به مقادیر MgO از تجزیه‌های توالی پوسته‌ای جنوب ده شیر. (توضیح بیشتر و منابع مورد استفاده در متن).



شکل ۸- نمودارهای عنکبوتی عناصر کمیاب بهنجار شده با مقادیر مورب عادی و بر اساس داده‌های Sun & Macdonough (1989).



شکل ۹- تغییرات عناصر ناسازگار نسبت به عنصر La. قلمروهای مربوط به اقیانوس هند و تونگا نیز به منظور مقایسه نشان داده شده‌اند. قلمروهای مربوط به اقیانوس هند از داده‌های (Turner et al. (1997), Ewart et al. (1998); Mahoney et al. (2002), Rehkamper & Hafmann (1997) مربوط به کمان تونگا از (Marty & Zimmermann (1999) میانگین مورب عادی از متوسط داده‌های (Macdougall & Lugmair (1986) ; Marty & Zimmermann (1999) برگرفته شده است.



شکل ۱۰- موقعیت تجزیه‌های منطقه و تأثیر بیشتر سیال‌ها و نقش کمتر رسوبات در منشأ افولیت جنوب ده شیر. در نمودار نسبت  $Ba/Th$  به  $Th/Nb$  بیشتر نقاط متعادل به قلمروی تونگا هستند که می‌تواند نشان از نقش سیال‌های آب‌دار در منشأ ماگمای سازنده این سنگ‌ها داشته باشد که از آبدزایی پوسته اقیانوسی دگرسان شده و یا رسوبات (صفحه فرورونده) حاصل شده‌اند. در حالی که نسبت بالای عناصر  $Th/Nb$  نشان از مشارکت مذاب‌های حاصل از ذوب‌بخشی رسوبات فرورونده دارد که البته در منشأ توالی پوسته‌ای جنوب ده شیر نقش مذاب ناچیز بوده است. داده‌ها نیز از Tian et al. (2008) و منابع آن برگرفته شده است.

خلعت‌بری، م. و سپهر، ه.، ۱۳۹۰- زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی افیولیت تکتونیزه کهدوئیه، فصلنامه علوم‌زمین، سال بیست و یکم، شماره ۸۲، صفحه ۱۰۳ تا ۱۱۲.

## References

- Arculus, R. J., 1994- Aspects of magma genesis in Arcs. *Lithos*, 33, 189-208.
- Beccaluva, L., Coltortia, M., Giuntab, G. & Sienaa F., 2004- Tethyan vs. Cordilleran ophiolites: a reappraisal of distinctive tectono-magmatic features of supra-subduction complexes in relation to the subduction mode. *Tectonophysics*, 393, p163-174.
- Bosch, D., Jamais, M., Boudier, F., Nicolas, A., Dautria, J. M. & Agrinier, P., 2004- Deep and high temperature hydrothermal circulation in the Oman ophiolite: petrological and isotopic evidence. *J. Petrol.* 45 (6), 1181–1208.
- Caulfield, J. T., Turner, S. P., Dosseto, A., Pearson, N. J. & Beier, C., 2008- Source depletion and extent of melting in the Tongan sub-arc mantle. *Earth and Planetary Science Letters*. 273: 279-288.
- Davidson, J. P., 1996- Deciphering mantle and crustal signatures in subduction zone magmatism. In *Bebout G. E., Scholl D., Kirbooy S. H. & Platt J. P. (eds). Subduction: Top to Bottom, Geophysical Monograph, 96, pp. 251-62. American Geophysical Union, Washington, DC.*
- Dilek, Y. & Furnes, H., 2009- Structure and geochemistry of Tethyan ophiolites and their petrogenesis in subduction rollback systems. *Lithos*, doi: 10.1016/j.lithos.2009.04.022.
- Dilek, Y. & Thy, P., 2006- Age and petrogenesis of plagiogranite intrusions in the Ankara mélange, central Turkey. *Island Arc*, 15, 44-57.
- Dilek, Y., 2003- Ophiolite concept and its evolution, *in* Dilek, Y., and Newcomb, S., eds., *Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought: Geological Society of America Special Paper 373*, pp. 1–16.
- Dilek, Y., Furnes, H. & Shallo, M., 2007- Suprasubduction zone ophiolite formation along the periphery of Mesozoic Gondwana. *Gondwana Research* 11, pp. 453-475. DOI:10.1016/j.gr.2007.01.005.
- Dixon, J. E., Stolper, E. & Delaney, J. R., 1988- Infrared spectroscopic measurements of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in Juan de Fuca Ridge basaltic glasses. *Earth and Planetary Science Letters* 90, 87–104.
- Elliott, T., Plank, T., Zindler, A., White, W. & Bourdon, B., 1997- Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *J. Geophys. Res.* 102, pp.14991–15019.
- Emami, M. H., Sadeghi, M. M. & Omrani, S. J., 1993- Magmatic map of Iran. Scale 1:100,000, Geological Survey of Iran.
- Ewart, A., Collerson, K. D., Regelous, M., Wendt, J. I. & Niu, Y., 1998- Geochemical evolution within the Tonga–Kermadec–Lau arc–backarc system: the role of varying mantle wedge composition in space and time. *Journal of Petrology* 39, 331–368.
- Falloon, T. J. & Danyushevsky, L. V., 2000- Melting of refractory mantle at 1.5, 2.0 and 2.5 GPa under anhydrous and H<sub>2</sub>O-undersaturated conditions: implications for the petrogenesis of high-Ca boninites and the influence of subduction components on mantle melting. *Journal of Petrology* 41, 257–283.
- Faustino, D. V., Yumul, Jr., Dimalanta, C. B., De Jusu, J. V., Zhou, M-F., Aitchison, J. C. & Tamayo, R. A., 2006- Volcanic-hypabyssal rock geochemistry of a subduction-related marginal basin ophiolite: Southeast Bohol Ophiolite-Cansiwang Melange Complex, Central Philippines. *Geosciences Journal*, Vol. 10, No. 3, p291-303.
- France, L., Ildefonse, B. & Kopeke, J., 2009a- The sheeted dike/gabbro transition in the Oman ophiolite and in the IODP Hole 1256D: Fossilisation of a dynamic melt lens at a fast spreading ridges. *Geochem Geophys Geosyst* 10:Q10019. doi: 10.1029/2009.
- France, L., Kopeke, J., Ildefonse, B., Cichy, S. B. & Deschamps, F., 2010- Hydrous partial melting in the sheeted dike complex at fast spreading ridge: experimental and natural observations. *Contrib Mineral Petrol* (2010) 160:683-704.
- Ghasemi, A. & Talbot, C. J., 2006- A new tectonic scenario for the Sanandaj- Sirjan zone (Iran). *J. Asian Earth sci.* 26 , pp.683-693.
- Hawkins, J. W. & Allan, J. F., 1994- Petrologic evolution of the Lau Basin, Sites 834–839. In: *Hawkins, J.W., Parson, L.M., Allan, J.F., et al. (Eds.), Proceedings of the Ocean Drilling Program. . Scientific Results, vol. 135. Ocean Drilling Program, College Station, TX, pp. 427–470.*
- Hawkins, J. W. & Melchior, J. T., 1985- Petrology of Mariana Trough and Lau Basin basalts. *Journal of Geophysical Research* 90, 11431–11468.
- Hawkins, J. W., 1976- Petrology and geochemistry of basaltic rocks of the Lau Basin. *Earth and Planetary Science Letters* 28, 283–297.
- Herbert, L. B., Asimow, P. & Antoshechkina, P., 2009- Fluid source-based modeling of melt initiation within the subduction zone mantle wedge: Implication for geochemical trends in arc lavas. *Chemical Geology*. Article in press.
- Hermann, J., 2002- Allanite: thorium and light rare earth element carrier in subducted crust. *Chemical Geology* 192, 289–306.
- Hochstaedter, A. G., Gill, J. B., Kusakabe, M., Newman, S., Pringle, M., Taylor, B., & Fryer, P., 1990- Volcanism in the Sumisu Rift, I. Major element, volatile, and stable isotope geochemistry. *Earth and planetary science letters* 100, 179–194.
- Ishikawa, A., Kaneko, Y., Kadarusman, A. & Ota, T., 2007- Multiple generations of forearc mafic–ultramafic rocks in the Timor–Tanimbar ophiolite, eastern Indonesia. *Gondwana Research* 11, 200–217. doi:10.1016/j.gr.2006.04.007.
- Juteau, T. & Maury, R., 1999- “The oceanic crust, from accretion to mantle recycling”, Springer-Paris, Chichester, 18, 109-121.

- Juteau, T. & Maury, R., 2009- La croute Océanique, Pétrologie et Dynamique Engogene. Société Géologique de France Vuibert. Paris, Cedex 13.
- Kelly, K. A., Plank, T., Grove, T. L., Stolper, E. M., Newman, S. & Hauri, E., 2006- Mantle melting as a function of water content beneath back-arc basins. *Journal of Geophysical Research* 111. doi:10.1029/2005JB003732 B09208.
- Keppler, H., 1996- Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction-zone fluids. *Nature* 380, 237–240.
- Kuzmichev, A., Kröner, A., Hegner, E., Dunyi, L. & Yusheng, W., 2005- The Shishkhd ophiolite, northern Mongolia: A key to the reconstruction of a Neoproterozoic island-arc system in central Asia. *Precambrian Research* 138, 125–150. doi:10.1016/j.precamres. 2005.04.002.
- Langmuir, C. H., Bézoz, A., Escrig, S. & Parman, S.W., 2006- Chemical systematics and hydrous melting of the mantle in back-arc basins. In: Christie, D.M., et al. (Ed.), *Back-arc spreading systems: geological, biological, chemical and physical interactions*. *Geophysical Monograph Series*, vol. 166. American Geophysical Union, pp. 87–146.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. & Zanettin, B., 1986- A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica diagram. *J. Petrology*, 27, 745-750.
- Lin, P. N., Stern, R. J. & Bloomer, S. H., 1989: Shoshonitic volcanism in the northern Mariana arc: 2. Large-ion lithophile and rare element abundances: Evidence for the source of incompatible element enrichments in intraoceanic arcs. *J. Geophys. Res.* 94: 497- 4514.
- Macdougall, J. D. & Lugmair, G. W., 1986- Sr and Nd isotopes in basalts from the East Pacific Rise: significance for mantle heterogeneity. *Earth and Planetary Science Letters* 77, 273–284.
- Mahoney, J. J., Graham, D. W., Christie, D. G., Johnson, K. T. M., Hall, L. S. & VonderHaar, D. L., 2002- Between a hot spot and a cold spot: isotopic variation in the Southeast Indian Ridge asthenosphere, 86°–118°E. *J. Petrol.* 43, 1155–1176.
- Marty, B. & Zimmermann, L., 1999- Volatiles (He, C, N, Ar) in mid-ocean ridge basalts: assessment of shallow-level fractionation and characterization of source composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63 (21), 3619–3633.
- McCulloch, M. T. & Gamble, J. A., 1991- Geochemical and geodynamical constraints on subduction magmatism. *Earth Planet. Sci. Lett.* 102, 358–374.
- Michael, P. J. & Chase, R. L., 1987- The influence of primary magma composition, H<sub>2</sub>O and pressure on mid-ocean ridge basalt differentiation. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 96, 245–264.
- Michael, P. J. & Schilling, J-G., 1989- Chlorine in mid-ocean ridge magmas: evidence for assimilation of seawater-influenced components. *Geochim Cosmochim Acta* 53: 3131–3143.
- Miller, D. M., Goldstein, S. L. & Langmuir, C. H., 1994- Cerium/lead and lead isotope ratios in arc magmas and the enrichment of lead in the continents. *Nature* 368, 514–520.
- Miyashiro, A., 1973- The Troodos Complex was probably formed in an island arc. *Earth Planet. Sci. Lett.* 25, 217-222.
- Nicolas, A., Boudier, F., Koepke, J., Lydéric, F., Ildefonse, B. & Mével, C., 2008- Root zone of the sheeted dike complex in the Oman ophiolite. *Geochem. Geophys. Geosys* 9 (5). doi:10.1029/2007GC001918.
- Niu, Y. & Batiza, R., 1997- Trace element evidence from seamounts for recycled oceanic crust in the eastern Pacific mantle. *Earth and Planetary Science Letters* 148, 471–483.
- Pearce, J. A. & Peate, D. W., 1995- Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 23, 251–285.
- Pearce, J. A., 1982- Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: R.S. Thorpe (ed). *Andesites, Orogenic Andesites and Related Rocks*. John Wiley and Sons, New York, pp. 528-548.
- Pearce, J. A., 2003.- Supra- subduction zone ophiolites: The search for modern analogues. In: Dilek Y and Newcomb S. *Ophiolites concept and evolution of geological thought*. *Geol. Soc. Amer. Special Paper*, 373, Boulder, Colorado, 269-293.
- Pearce, J. A., Stern, R. J., Bloomer, S. H. & Fryer, P., 2005- Geochemical mapping of the Mariana arc-basin system: implications for the nature and distribution of subduction components. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6 Q07006.
- Rayan, J. G. G., Morris, J., Tera, F., Leeman, W. P. & Tsvetkov, A., 1995- Cross-arc geochemical variations in the Kurile Arc as a function of slab depth. *Science* 270, 625–627
- Rehkämper, M. & Hofmann, A. W., 1997- Recycled ocean crust and sediment in Indian Ocean MORB. *Earth and Planetary Science Letters* 147, 93–106.
- Robertson, A., 2002- Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region. *Lithos.*, 65, 1-67.
- Saccani, E. & Photiades, A., 2004- Mid-ocean ridge and supra- subduction affinities in the Pindos ophiolites (Greece): implications for magma genesis in a forearc setting. *Lithos.*, 73, 229-253.
- Shervais, J. W., 1982- Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 59(1), 101-118.
- Shervais, J. W., 2001- Birth, death, and resurrection: The life cycle of suprasubduction zone ophiolites. *Geochems. Geophys. Geosys.* PN 2000 GC00080. ISSN 1525-2027.

- Shervais, J. W., Kimbrough, D. L., Renne, P., Hanan, B. B., Murchey, B., Snow, C. A., Schuman, M. M. Z. & Beaman, J., 2007- Multi-Stage Origin of the Coast Range Ophiolite, California: Implications for the Life Cycle of Supra-Subduction Zone Ophiolites. *International Geology Review*, Vol. 46, 2004, p. 289–315.
- Sinton, J. M. & Fryer, P., 1987- Mariana Trough lavas from 18°N: implications for the origin of back-arc basin basalts. *Journal of Geophysical Research* 92, 12782–12802.
- Stern, R. J. & Bloomer, S. H., 1992- Subduction zone infancy: examples from the Eocene Izu- Bonine- Mariana and Jurassic California arcs. *Geol. Society of Amer. Bull.*, 104, 1624-1636.
- Stern, R. J., Kohut, E. J., Bloomer, S. H., Leybourne, M., Fouch, M. & Vervoot, J., 2006- Subduction factory processes beneath the Guguan cross-chin, Mariana Arc: no role for sediments, are serpentinites important? *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 151 (2), 202-221. doi:10.1007/s00410-005-2.
- Sun, S. S. & McDonough, W. F., 1989- Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and process. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society of London Special Publication, 42, pp.313–345.
- Taylor, B. & Martinez, F., 2003- Back-arc basin basalt systematics. *Earth and Planetary Science Letters* 210, 481–497.
- Thirlwall, M. F., Smith, T. E., Graham, A. M., Theodorou, N., Hollings, P., Davidson, J. P., Arculus, R. J., 1996- High field strength elements anomalies in arc lavas: Source or process. *Journal of Petrology*, 35, 819-38.
- Tian, L., Castillo, P. R., Hawkins, J. W., Hilton, D. R., Hanan, B. H. & Pietruszka, A. J., 2008. Major and trace element and Sr-Nd isotope signatures of lavas from the central Lau Basin: implications for the nature and influence of subduction components in the back-arc mantle. *Journal of Vol. Geoth. Research*. 178, 657-670.
- Turner, S. P. & Hawkesworth, C. J., 1997- Constraints on flux rates and mantle geodynamics beneath island arcs from Tonga–Kermadec lava geochemistry. *Nature* 389, 568–573.
- Turner, S. P., Hawkesworth, C. J., Rogers, N., Bartlett, J., Worthington, T., Hergt, J., Pearce, J. A. & Smith, I., 1997- 238U–230Th disequilibria, magma petrogenesis, and flux rates beneath the depleted Tonga–Kermadec island arc. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, vol. 39.
- Wood, D. A., 1980- The applications of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters* 50, 11–30.
- You, C. F., Castillo, P. R., Gieskes, J. M., Chan, L. H. & Spivack, A. J., 1996- Trace element behavior in hydrothermal experiments: implications for fluid processes at shallow depths in subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters* 140, 41–52.
- Yunpeng, D. & Bingquan, Z., 2000- Characteristics of the island-arc pillow lavas from southeast Yunnan Province, and its tectonic implications for Paleo-Tethys in South China. *Chinese Science Bulletin* Vol. 45 No. 8. pp. 753-758.