



فرآیندهای پتروژنتیکی، شرایط تبلور و ماهیت ماگماتیسیم لمپروفیرهای اسپسارتیتی کالک آلکالن الیگوسن زیرین منطقه کال کافی (شرق انارک، استان اصفهان)

غلام حسین نظری و قدرت ترابی*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۱۸

چکیده

دایک‌ها و استوک‌های لمپروفیری الیگوسن در منطقه کال کافی (ایران مرکزی، غرب بلوک یزد)، سنگ‌های ولکانیک ائوسن و سایر واحدهای قدیمی‌تر همچون سنگ آهک‌های کرتاسه را قطع کرده‌اند. این لمپروفیرها دارای فنوکریست‌های هورنبلند (مگنزیوهایستینگزیت)، پیروکسن (دیوپسید) و پلاژیوکلاز (لابرادوریت تا بیتونیت) در یک ماتریکس دانه ریز تا دانه متوسط شامل همان کانی‌ها و آپاتیت، مگنتیت، اپیدوت و کلریت هستند. زونینگ نوسانی فنوکریست‌های کلینوپیروکسن و گستره تدریجی مقادیر Al_2O_3 (۱/۳۴ تا ۵/۴۹ درصد وزنی) و TiO_2 (۰/۳۷ تا ۰/۸۳ درصد وزنی) آنها، بیانگر تبلور این کانی‌ها در حین صعود، همراه با تغییرات فشار است. با توجه به نتایج بررسی‌های پتروگرافی، نوع و ترکیب شیمیایی کانی‌های سازنده این لمپروفیرها، می‌توان آنها را اسپسارتیت‌های کالک آلکالن نامید. نتایج آنالیز عناصر کمیاب فنوکریست‌های آمفیبول، پیروکسن و پلاژیوکلاز با استفاده از دستگاه LA-ICP-MS نشان می‌دهد که آمفیبول‌ها بیشترین و پلاژیوکلازها کمترین مقدار عناصر نادر خاکی را دارند. ترموبارومتري آمفیبول و پیروکسن‌های موجود در لمپروفیرهای کال کافی به ترتیب دمای میانگین ۸۸۶ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۵ تا ۳/۰ و ۲ تا ۵ کیلوپار را نشان می‌دهند. فشارهای به دست آمده اعماق ۷ تا ۱۷ کیلومتر را برای تبلور کلینوپیروکسن‌ها و ۶ تا ۱۱ کیلومتر را برای تبلور آمفیبول‌ها مشخص می‌کنند. دمای تعادل زوج کانی همزیست آمفیبول - پلاژیوکلاز به طور متوسط ۸۶۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است. ویژگی‌های ژئوشیمیایی کانی‌های سازنده لمپروفیرهای کال کافی نشان می‌دهد که ماگمای سازنده این سنگ‌ها در محیط تکتونوماگمایی مرتبط با فرورانش ایجاد شده و محصول ذوب یک اسپینل لرزولیت گوشته لیتوسفری بوده است.

واژه‌های کلیدی: اسپسارتیت، لمپروفیر، کالک آلکالن، الیگوسن، کال کافی، ایران مرکزی

مقدمه

می‌شوند. این سنگ‌ها تابع تقسیم‌بندی بر اساس خواص مودال مانند نمودار QAPF و نمودارهای توصیف ترکیبی همچون TAS نیست و با ابزارهای کانی‌شناسی و ماهیت ژئوشیمیایی بررسی می‌شوند. به علت محتوای بسیار متغیر H_2O و CO_2

اصطلاح لمپروفیر به گروهی از سنگ‌های آذرین مافیک تا حدواسط و عمدتاً سابولکانیک گفته می‌شود که غالباً به صورت دایک در محیط‌های مختلف زمین‌ساختی یافت

گرفتن زمان لمپروفیرهای کال کافی و فاصله تا محل زمین‌درز زاگرس، می‌توان بیان داشت این لمپروفیرها همچون لمپروفیرهای آلکالن جنندق (Torabi, 2010)، تحت تأثیر فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس از تریاس تا ائوسن اطراف خردقاره به وجود آمده و ارتباطی با فرورانش‌های پالتوتتیس (عامل غنی‌شدگی متل در پالتوزوئیک بالایی) و نئوتتیس زاگرس نداشته باشند.

لمپروفیرها با بافت هم بعد دانه^۱ در منطقه کال کافی (شرق منطقه انارک) به صورت دایک و استوک دیده می‌شوند که ولکانیک‌های ائوسن را قطع کرده‌اند. بررسی شیمی‌فازهای مافیک مثل آمفیبول و پیروکسن منعکس‌کننده بهتری از شرایط اولیه ترکیب شیمیایی ماگمای به وجود آورنده هستند و نقشی مهم در تعیین دسته ماگمایی سنگ میزبان و در نهایت تعیین موقعیت تکتونو-ماگمایی دارند. بررسی شیمی آمفیبول، پیروکسن و پلاژیوکلاز برای فراهم آوردن درک بهتری از فرآیندهای پتروژنتیکی و شرایط تبلور و ماهیت ماگماتیسم لمپروفیری از اهداف این پژوهش است. تا کنون هیچ‌گونه بررسی زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی بر روی دایک‌های لمپروفیری این منطقه انجام شده است و بررسی آنها کمکی مهم در درک فرآیندهای پتروژنتیکی و تحولات زمین‌ساختی منطقه خواهد بود.

زمین‌شناسی منطقه

کمپلکس آذرین کال کافی جزئی از زون ساختاری ایران مرکزی (بلوک یزد) و زیرزون انارک - خور به حساب می‌آید (Yakovenko et al., 1981; Aistov et al., 1984) که بین طول‌های جغرافیایی ۵۴ درجه تا ۵۴ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۳° ۱۵' تا ۳۳° ۳۰' شمالی واقع شده است (شکل ۱).

قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه مجموعه دگرگونی انارک موسوم به شیست‌های انارک منسوب به پرکامبرین و پالتوزوئیک

ترکیب شیمیایی سنگ کل لمپروفیرها که در برخی نمونه‌ها، اولیه و در برخی دیگر ثانویه هستند، تقسیم‌بندی کانایی یا شیمیایی این سنگ‌ها با مشکلات فراوانی روبه‌روست (Woolley et al., 1996). لمپروفیرها به دلیل محتوی بالای مواد فرار از دیگر دایک‌های مافیک مجزا می‌شوند و توانایی بالایی از نظر فلزات با ارزش دارند. طی ۳۰ سال گذشته IUGS دسته‌بندی‌های مختلفی بر روی لمپروفیرها برای از بین بردن تناقضات انجام داده است. یکی از جامع‌ترین تقسیم‌بندی‌ها بر اساس فراوانی کانی‌های روشن و کانی‌های مافیک مربوط به لوپاس (Le Bas, 2007) است.

در ایران مرکزی که از لحاظ زمین‌ساختی یک زون فعال است بروزدهای کوچکی از لمپروفیرها با سن پالتوزوئیک تا الیگوسن و در محیط‌های مختلف زمین‌ساختی یافت می‌شود (Torabi, 2010; Torabi, 2009). ترابی (Torabi, 2009) با بررسی لمپروفیرهای آلکالن پالتوزوئیک بالایی منطقه پل هاوند تشکیل این سنگ‌ها را به فرورانش پالتوتتیس و متاسوماتیسم گوشته گارنت لرزولیتی آن منطقه نسبت می‌دهد. همچنین ترابی (Torabi, 2010) با بررسی لمپروفیرهای الیگوسن زیرین منطقه جنندق (استان اصفهان - ایران مرکزی) تشکیل این سنگ‌ها را به فرورانش پوسته اقیانوسی اطراف خرد قاره شرق - ایران مرکزی نسبت می‌دهد. بیات و ترابی (Bayat and Torabi, 2011) محدوده انارک تا بیاضه را یک منطقه لمپروفیری پالتوزوئیک معرفی می‌کنند و بیان می‌دارند که فرورانش پوسته اقیانوسی پالتوتتیس از اردوئین تا پرمین و متاسوماتیسم گوشته باعث تشکیل این لمپروفیرها در امتداد گسل‌های اصلی و فرعی منطقه شده است. منطقه انارک تا بیاضه منطقه نسبتاً وسیعی با طول بیش از ۱۳۰ کیلومتر در غرب CEIM است که منطقه کال کافی در بخش شمالی این منطقه قرار دارد. لمپروفیرهای پالتوزوئیک دارای ماهیت آلکالن و از نوع کامپونیت با فاصله زمانی در حدود ۲۰۰ میلیون سال نسبت به لمپروفیرهای کال کافی رخ داده‌اند (Bayat and Torabi, 2011). با در نظر

دایک‌های لمپروفیری موجود در منطقه (شکل ۲) نسبت به ولکانیک‌های ائوسن و دایک‌های قطع‌کننده آنها جواترند و به نظر می‌رسد همچون سایر لمپروفیرهای ترشیر بلوک ناین (بلوک یزد) متعلق به الیگوسن زیرین باشند.

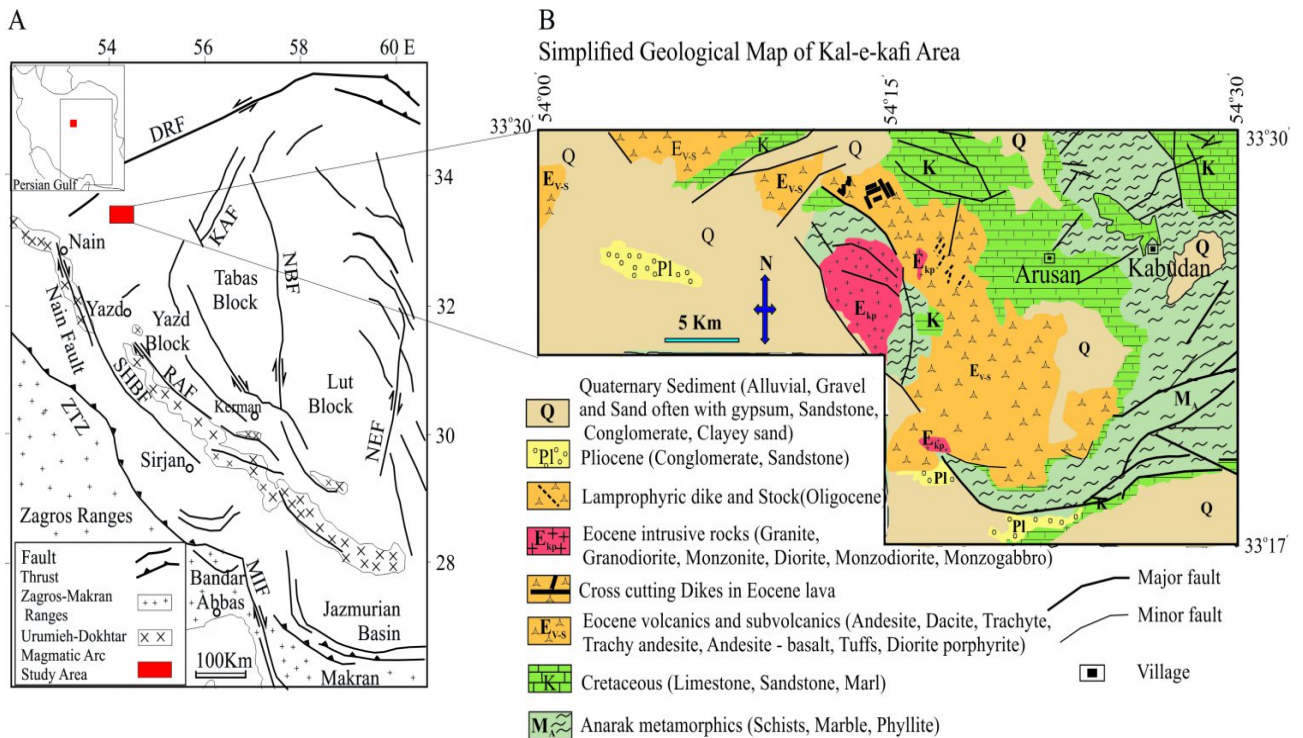
روش کار

برای بررسی لمپروفیرهای کال کافی، بررسی‌های زمین‌شناسی صحرایی و نمونه‌برداری از این واحدها صورت گرفت. پس از بررسی پتروگرافی، مقاطع نازک صیقلی پوشیده با کربن، برای آنالیز EPMA و سپس LA-ICP-MS تهیه شدند. آنالیز EPMA توسط دستگاه مایکروپروب Jeol مدل JXA-8800R در شرایط ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰ کیلوولت، شدت جریان ۲۰ آمپر و برنامه تصحیح گر ZAF در دانشگاه کانازاواوی ژاپن صورت گرفت (جدول ۱).

آنالیز عناصر فرعی و نادر خاکی موجود در آمفیبول، پیروکسن و پلاژیوکلاز توسط LA-ICP-MS انجام شد. مدل دستگاه سایش لیزری^۱ مورد استفاده 193 nm ArF است و برای طیف‌سنجی از طیف‌سنج جرمی پلاسمایی القایی مزدوج ICP-MS مدل Agilent 7500S استفاده شد. برای محاسبه فرمول ساختاری، تعیین نوع کانی‌ها و جدایش Fe^{2+} و Fe^{3+} از نرم‌افزار Minpet 2.02 استفاده شد. در این نرم‌افزار از روش Cations 13CNK و در نظر گرفتن ۲۳ اکسیژن برای محاسبه آمفیبول‌ها و همچنین برای محاسبه پیروکسن‌ها و فلدسپارها به ترتیب ۶ و ۸ اکسیژن در نظر گرفته شد. برای تفکیک Fe^{2+} و Fe^{3+} از روش توازن بار استفاده شد. دقت آنالیزهای انجام‌شده در روش میکروپروب ۰/۰۱ درصد وزنی بوده است. دقت عناصر و شرایط انجام آنالیزها در استفاده از LA-ICP-MS نیز در منابع ایشیدا و همکاران (Ishida et al., 2004) و موریشیتا و همکاران (Morishita et al., 2005a, 2005b) آورده شده است. نام اختصاری کانی‌ها نیز بر اساس ویتنی و ایوانس (Whitney and Evans, 2010) است. $Mg\#$ و $Fe\#$ کانی‌ها به صورت $Mg / (Mg + Fe^{2+})$ و $(Fe^{2+} + Mg) / (Fe^{2+} + Mg)$ محاسبه شده است.

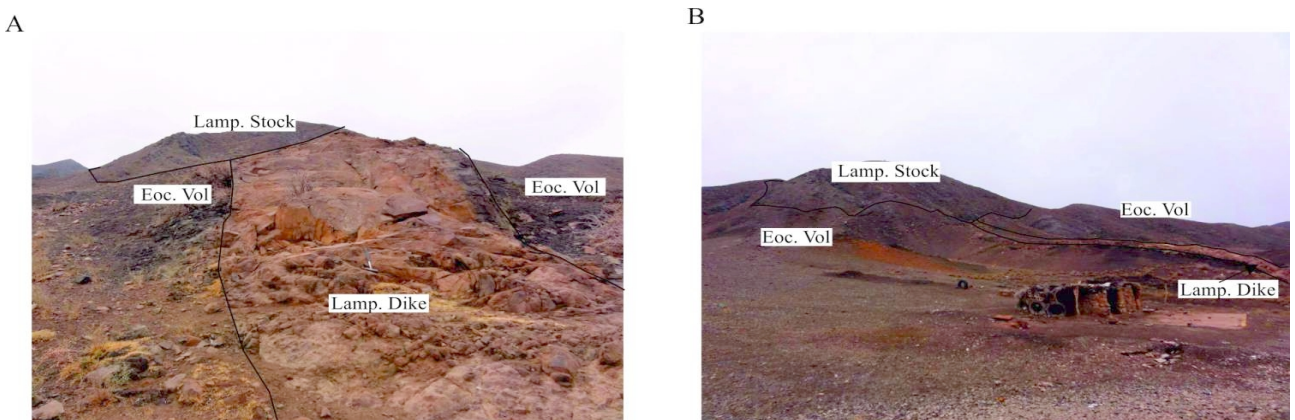
هستند. واحدهای رسوبی کرتاسه زیرین شامل آهک‌های اریتولین‌دار با ضخامت قابل ملاحظه، مارن، ماسه‌سنگ و کنگلومرا به صورت ناپیوسته بر روی تشکیلات پالئوزوئیک قرار گرفته‌اند. مجموعه‌های ولکانیک ائوسن شامل داسیت، آندزیت، تراکی آندزیت، تراکیت، آندزیت‌بازالت، دیوریت و توف در بخش شرقی و جنوب‌شرقی با ناپیوستگی بر روی واحدهای رسوبی کرتاسه زیرین قرار گرفته‌اند و در قسمت غربی دارای همبری گسله با توده نفوذی کال کافی به سن ائوسن بالایی - الیگوسن زیرین (Aistov et al., 1984) هستند. شواهد صحرایی - زمین‌شناسی و تعیین سن مطلق انجام‌شده توسط زمین‌شناسان روس به روش K-Ar سنی در حدود ۵۳ میلیون سال برای آندزیت‌های مجموعه ولکانیک ائوسن کال کافی و ۴۸ میلیون سال برای داسیت‌های این مجموعه نشان می‌دهد (Yakovenko et al., 1981; Aistov et al., 1984). احمدیان و همکاران (Ahmadian et al., 2016) نیز سن 1 ± 52 میلیون سال برای کوارتز مونزونیت‌ها و سن $1 \pm 50/3$ میلیون سال را برای گرانیت‌ها به روش U-Pb موجود در زیرکن‌ها به دست آورده است. سن‌های به دست آمده منطبق با ائوسن زیرین هستند. بهادران (Bahadoran, 2007) با بررسی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن منطقه عروسان (شرق کال کافی) ماهیت ماگمایی سنگ‌های منطقه را طیفی از کالک‌آلکانل پتاسیم بالا تا شوشونیتی بیان می‌دارد. بررسی‌های انجام‌شده توسط احمدیان و همکاران (Ahmadian et al., 2009) نشان می‌دهد که توده نفوذی کال کافی حداقل دارای چهار فاز ماگمایی با ترکیبی از گابرو تا گرانیت است. احمدیان و همکاران (Ahmadian et al., 2016) کمپلکس نفوذی کال کافی را مرتبط با سابداکشن می‌دانند که از ذوب‌بخشی پوسته زیرین مجزا شده به وجود آمده و ماهیتی شوشونیتی و آداکتی دارد.

در منطقه مورد بررسی استوک و دایک‌هایی دیده می‌شوند که درون ولکانیک‌های ائوسن منطقه نفوذ کرده‌اند. استوک و



شکل ۱. A: موقعیت منطقه کال کافی در درون بلوک یزد (modified after Alavi, 1991) و B: نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه بر اساس نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ کبودان (DRF = Doruneh Fault, KAF = Kalmard Fault, JB = Jazmurian Basin, MIF = Minab Fault, NBF = Nayband Fault, NEF = Nehbandan Fault, RAF = Rafsanjan Fault, SHBF = Shahr-e-Babak Fault, ZTZ = Zagros Thrust Fault)

شکل ۲. A: نفوذ دایک لمپروفیری (Lamp. Dike) درون سنگ‌های ولکانیک‌های ائوسن کال کافی (شرق انارک، استان اصفهان) (Eoc. Vol) و B: دایک و استوک لمپروفیری (Lamp. Stock) درون ولکانیک‌های ائوسن کال کافی (شرق انارک، استان اصفهان)



شکل ۲. A: نفوذ دایک لمپروفیری (Lamp. Dike) درون سنگ‌های ولکانیک‌های ائوسن کال کافی (شرق انارک، استان اصفهان) (Eoc. Vol) و B: دایک و استوک لمپروفیری (Lamp. Stock) درون ولکانیک‌های ائوسن کال کافی (شرق انارک، استان اصفهان)

شکل ۲. A: Intrusion of Lamprophyric Dike (Lamp. Dike) within the Kal-e-kafi Eocene volcanic rocks (Eoc. Vol.) (East of Anarak, Isfahan province), and B: Lamprophyric Stock (Lamp. Stock) and Dike within Kal-e-kafi Eocene volcanic rocks (East of Anarak, Isfahan province)

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمی (Wt%) و محاسبه فرمول ساختاری کانی‌های موجود در لمپروفیرهای منطقه کال کافی (شرق انارک، استان اصفهان) (به ترتیب بر اساس ۲۳، ۶ و ۸ اکسیژن برای آمفیبول، پیروکسن و پلاژیوکلاز)

Table 1. Chemical analyses (Wt%) and calculate structural formula of minerals in Kal-e-kafi lamprophyres (East of Anarak, Isfahan province) (respectively base on 23, 6 and 8 oxygen for amphibole, pyroxene and plagioclase)

Sample	B842	B844	B844	B844	B842	B844	B844	B844	
Point	134	143	147	156	165	144	149	150	154
Mineral	Amp	Amp	Amp	Cpx	Cpx	Cpx	Pl	Pl	Pl
Position	Core	Rim	-	Core	Rim	-	-	-	Rim
SiO ₂	42.35	42.77	42.22	51.19	51.81	51.70	54.94	55.52	51.53
TiO ₂	2.51	2.68	2.64	0.71	0.58	0.63	0.02	0.00	0.01
Al ₂ O ₃	12.34	11.63	12.80	4.25	3.35	3.84	28.41	28.18	30.76
FeO*	12.90	12.37	12.37	7.81	7.93	7.61	0.48	0.49	0.52
MnO	0.30	0.28	0.18	0.22	0.35	0.22	0.00	0.03	0.02
MgO	12.73	13.29	12.76	14.12	13.88	14.30	0.03	0.03	0.05
CaO	11.43	11.38	11.42	21.45	21.81	21.75	10.82	10.56	13.59
NiO	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Na ₂ O	2.23	2.31	2.20	0.40	0.38	0.37	4.84	4.60	3.27
K ₂ O	1.32	1.16	1.21	0.03	0.03	0.00	0.37	0.43	0.22
Total	98.09	97.89	97.80	100.19	100.12	100.08	99.93	99.85	99.97
Si	6.20	6.25	6.18	1.89	1.92	1.91	2.48	2.50	2.34
Ti	0.276	0.295	0.290	0.020	0.016	0.018	0.001	0.00	0.000
Al ^[IV]	1.80	1.74	1.82	0.09	0.06	0.07	1.51	1.50	1.65
Al ^[VI]	0.33	0.26	0.38	0.09	0.08	0.08	(total)	(total)	(total)
Fe ³⁺	0.45	0.46	0.42	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	1.13	1.06	1.10	0.22	0.23	0.22	0.02	0.02	0.02
Mn	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Mg	2.78	2.90	2.78	0.78	0.77	0.79	0.00	0.00	0.00
Ca	1.79	1.78	1.80	0.85	0.87	0.86	0.52	0.51	0.66
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.63	0.66	0.63	0.03	0.03	0.03	0.42	0.40	0.29
K	0.25	0.22	0.23	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01
Total	15.67	15.65	15.64	4.00	4.00	4.00	4.98	4.96	4.98
Mg#	0.71	0.73	0.72	0.78	0.77	0.78	-	-	-
An	-	-	-	-	-	-	54.10	54.40	68.70
Ab	-	-	-	-	-	-	43.80	42.90	30.00
Or	-	-	-	-	-	-	2.20	2.70	1.30

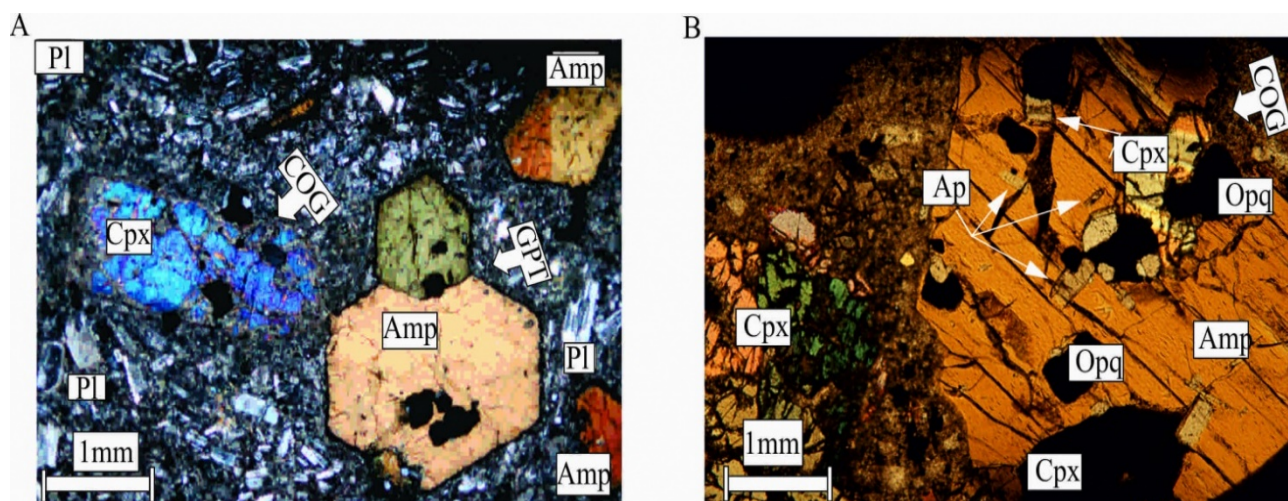
پتروگرافی

لمپروفیر کال کافی حاوی فنو کریست‌های آمفیبول، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز تا متوسط دانه شامل کانی‌های مشابه فنو کریست‌ها به اضافه کانی‌های اویک از

نوع مگنتیت، آلکالی فلدسپار، آپاتیت و کانی‌هایی ثانویه کلریت، اپیدوت، مگنتیت و کانی‌های رسی هستند (شکل ۳). فاز غالب در زمینه پلاژیوکلاز است. در این سنگ‌ها کوارتز دیده نمی‌شود و مقدار پلاژیوکلاز خیلی بیشتر از آلکالی

گلوپورفیریتیک بیانگر تبلور کانی‌ها طی دو مرحله در ماگما هستند و نشان می‌دهند که انجماد این ماگما به‌طور کامل در اعماق زمین صورت نگرفته؛ بلکه قسمتی از مذاب در حین صعود و حرکت به سمت بالا متبلور شده است که بافت گلوپورفیریتیک شاهدهی بر صعود ماگماست. علاوه بر بافت پورفیریتیک و گلوپورفیریتیک، کانی‌های آهن و منیزیم‌دار موجود در این سنگ‌ها ویژگی‌های بافت پان‌ایدیومورفیک را نشان می‌دهند که از بافت‌های شاخص لمپروفیرهاست و نشان می‌دهد بلورها در فضایی باز که سیالات پی در پی وارد می‌شده‌اند، رشد داشته‌اند (Woolley et al., 1996). در بررسی‌های میکروسکوپی پدیده زونینگ در برخی از فنوکریست‌های آمفیبول، پیروکسن و پلاژیوکلاز به‌خوبی دیده می‌شود. کلینوپیروکسن و آمفیبول‌ها در برخی موارد حاوی ادخال‌هایی از آپاتیت و مگنتیت هستند (شکل ۳-B) و گاهی نیز ادخال‌هایی از کلینوپیروکسن و یا پلاژیوکلاز نیز در آمفیبول‌ها دیده می‌شود (شکل ۳-B).

فلدسپار است. با توجه به فراوانی پلاژیوکلاز نسبت به آلکالی فلدسپار و فراوانی آمفیبول‌های کلسیم‌دار نوع مگنزیوهایستینکسیت، بر اساس تقسیم‌بندی لوپاس (Le Bas, 2007) که بر اساس فراوانی کانی‌های مافیک و فلسیک، لمپروفیرهای کالک‌آلکان را دسته‌بندی می‌کند، این سنگ‌های لمپروفیری را می‌توان اسپسارتیت نام نهاد. این اسپسارتیت‌ها مزوکرات بوده و بافت پورفیریتیک، گلوپورفیریتیک و پان‌ایدیومورفیک از خود نشان می‌دهند (شکل ۳). برخی از آمفیبول و پیروکسن‌ها دارای خلیج‌خوردگی هستند (شکل ۳-A) که نتیجه کاهش فشار و صعود ماگما به سمت ترازهای بالاتر است (Rutherford, 2008). فنوکریست‌های آمفیبول (شکل ۳-A)، پیروکسن و گاهی پلاژیوکلاز در مواردی به‌صورت تجمعی از بلورها دیده می‌شوند که بیانگر بافت گلوپورفیریتیک است. این بافت معمولاً در اثر صعود نسبتاً سریع ماگما به‌وجود می‌آید، به‌صورتی که ابتدا ماگما در مکانی متوقف‌شده و شروع به تبلور کرده است، سپس با صعود سریع ماگما، کانی‌های با چگالی مشابه به یکدیگر چسبیده‌اند. بافت پورفیریتیک و



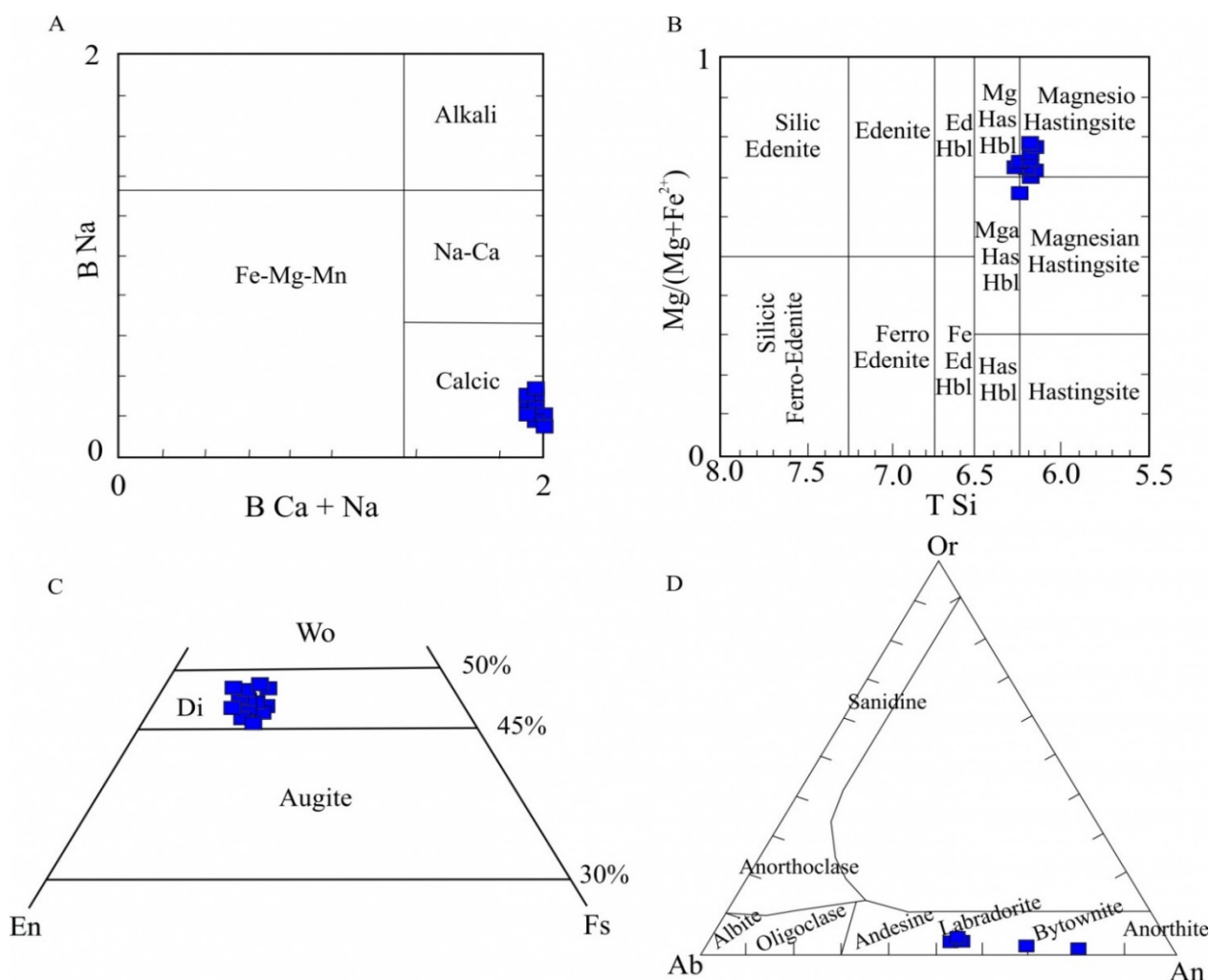
شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی لمپروفیرهای منطقه کال‌کافی (شرق انارک، استان اصفهان) در نور پلاریزه متقاطع (XPL) A: فنوکریست‌های اصلی تشکیل‌دهنده سنگ، خلیج‌خوردگی و بافت گلوپورفیریتیک در آمفیبول را نشان می‌دهد و B: ادخال‌های از پیروکسن، آپاتیت و کانی‌های اوپک از نوع مگنتیت درون آمفیبول دیده می‌شوند (بافت گلوپورفیریتیک = GPT و خلیج‌خوردگی = COG).

Fig. 3. Photomicrographs of Kal-e-kafi Lamprophyres (East of Anarak, Isfahan province) under cross-polarized light (XPL) A: Showing major phenocrysts component of rock, Corrosion Gulf and glomeroporphyritic raft of amphibole, and B: Inclusion of pyroxene, apatite and opaque minerals in magnetite type are observed within amphibole (GPT = Glomeroporphyritic Texture, COG = Corrosion Gulf)

ژئوشیمی کانی‌ها

بررسی شیمی کانی‌های موجود در سنگ‌های لمپروفیری کال کافی نشان می‌دهد Mg# آمفیبول‌ها به‌طور میانگین ۰/۷۳ و محتوی TiO₂ آنها نسبتاً بالا و در محدوده‌ای بین ۲/۳۵ تا ۲/۶۸ درصد وزنی و به‌طور میانگین ۲/۵۷ درصد وزنی است. با توجه به نمودار و تقسیم‌بندی لیک و همکاران (Leake et al., 1997)، آمفیبول‌های موجود در این سنگ‌ها کلسیک و از نوع مگزیوهایاستینگسیت، هورنبلند مگزیوهایاستینگسیتی و

هایاستینگسیت غنی از Mg هستند (شکل ۴-A و ۴-B). ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها با Mg# میانگین ۰/۷۸ در محدوده دیوپسید قرار می‌گیرد (شکل ۴-C). شیمی این کانی آشکار می‌کند که محدوده‌ای از محتوی TiO₂ بین ۰/۳۷ تا ۰/۸۳ درصد وزنی و Al₂O₃ بین ۱/۳۴ تا ۵/۵۰ درصد وزنی در کلینوپیروکسن‌ها وجود دارد. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز از نوع لابرادوریت تا بیتونیت و پلاژیوکلازهای زمینه از نوع لابرادوریت هستند (شکل ۴-D).



شکل ۴. نمودارهای ترکیبی آمفیبول، کلینوپیروکسن و فلدسپار موجود در لمپروفیر کال کافی (شرق انارک، استان اصفهان). A و B: آمفیبول‌ها (Leake et al., 1997)، C: پیروکسن‌ها (Morimoto et al., 1988) و D: نمودار تقسیم‌بندی فلدسپارها (Deer et al., 1996).

Fig. 4. Chemical graphs of amphibole, clinopyroxene and feldspar of Kal-e-kafi lamprophyres (East of Anarak, Isfahan province). A and B: Amphiboles (Leake et al., 1997), C: Pyroxenes (Morimoto et al., 1988) and, and D: Feldspars (Deer et al., 1996)

کال کافی همانند آمفیبول‌ها، تغییرات نوسانی از مرکز به سمت حاشیه کانی را نشان می‌دهند (شکل ۶-۵).

ترموبارومتري

تخمین مؤلفه‌های P-T و فوگاسیته اکسیژن در سیستم‌های ماگمایی برای بازسازی سازوکار پترولوژی سنگ‌ها ضروری است. آمفیبول یکی از کانی‌های سازنده محدوده گسترده‌ای از سنگ‌های آذرین و دگرگونی است و شاخصی مناسب برای شرایط تبلور هم به‌عنوان ژئوترموتر و هم به‌عنوان ژئوبارومتر به حساب می‌آید (Li, 1998). آمفیبول یک کانی پایدار در محیط‌های با آب بالای ۲ درصد وزنی و محدوده فشاری ۱/۵ تا ۱۲ کیلو بار یا اعماق پوسته نزدیک موهو است (Simakin et al., 2012). این کانی گاهی به تنهایی برای مثال (Schmidt, 1992; Anderson and Smith, 1995; Simakin et al., 2012) و گاهی همراه با پلاژیوکلاز (Holland and Blundy, 1994) به‌عنوان ژئوترموبارومتر استفاده می‌شود. همچنین دما، فشار و عمق تبلور سنگ‌های آذرین می‌تواند با استفاده از ترکیب کلینوپیروکسن و تعادل بین مذاب و کلینوپیروکسن سنجیده شود (Soesoo, 1997).

ترموبارومتري آمفیبول

تاکنون بررسی‌های متعددی در ارتباط با ماهیت آمفیبول‌های کلسیک موجود در سنگ‌های آذرین مافیک صورت گرفته است (Femenias et al., 2006; Baziotis et al., 2012; Ridolfi et al., 2010). این بررسی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش شرایط P-T، مقدار Mg# و محتوی K, Al, Na و Ti آمفیبول‌ها افزایش و مقدار Si و مجموع Fe+Mg+Mn+Ca کاهش رخ می‌دهد. انطباق خطی بین محتوی Al موجود در آمفیبول و شرایط فشار تبلور باعث انتشار بارومترهای بسیاری شده است (Hammarstrom and Zen, 1986; Hollister et al., 1987; Johnson and Rutherford, 1988; Schmidt, 1992; Anderson and Smith, 1995).

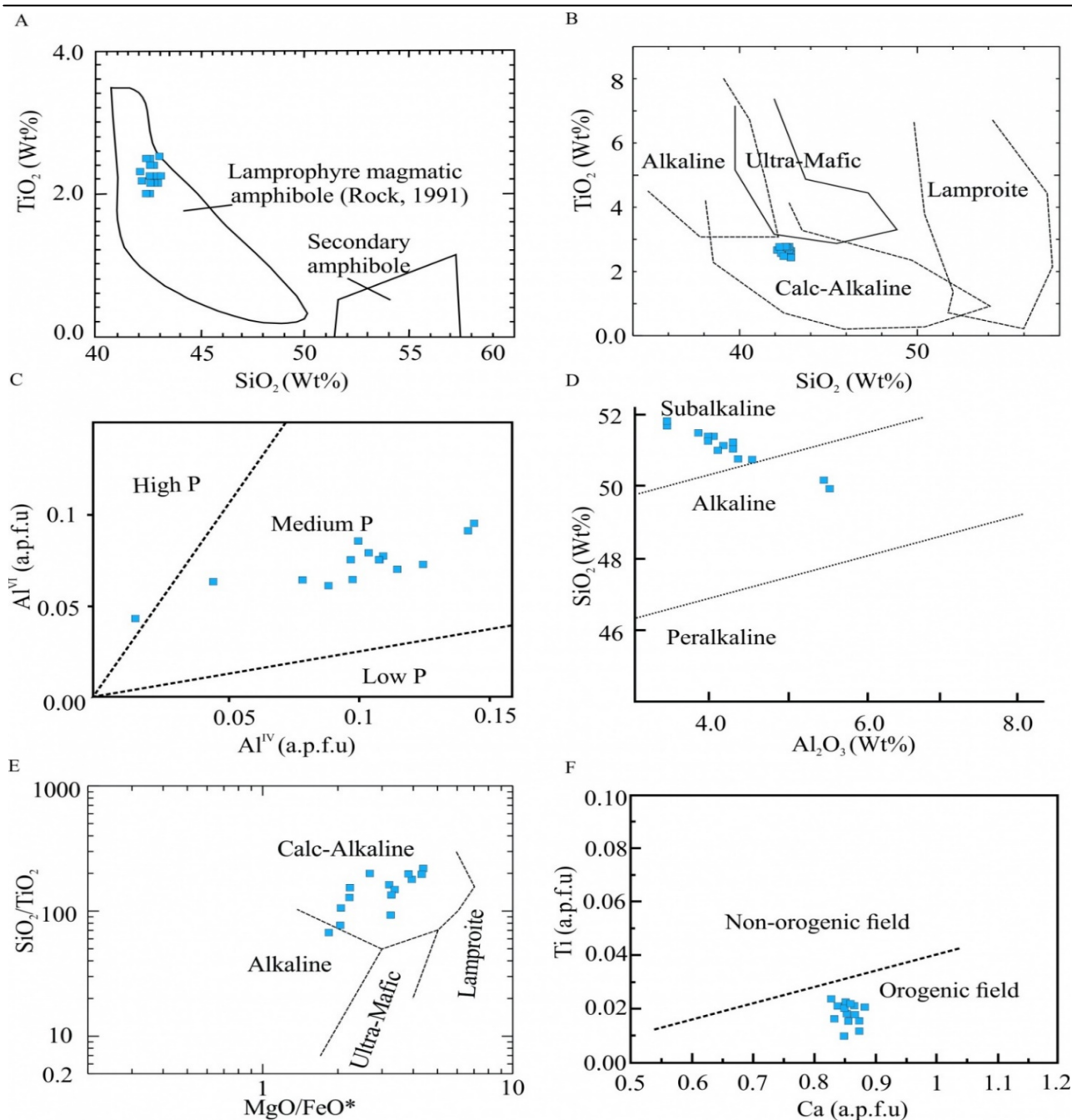
بررسی نتایج آنالیزهای شیمیایی آمفیبول، کلینوپیروکسن و فلدسپار موجود در این واحدهای سنگی می‌تواند در تعیین ماهیت و چگونگی تشکیل این واحدهای سنگی مؤثر باشد. ترسیم محتوی SiO_2 موجود در آمفیبول در برابر محتوی TiO_2 موجود در آنها لمپروفیر بودن و ماهیت کالک‌آلکان را برای سنگ‌های دربردارنده این آمفیبول‌ها نشان می‌دهد (شکل ۵-۵ و B).

محتوی Al^{IV} در برابر Al^{VI} موجود در کلینوپیروکسن می‌تواند نشان‌دهنده وضعیت مؤلفه فشار در هنگام تبلور کلینوپیروکسن باشد (Aoki and Kushiro, 1968). ترسیم محتوی Al^{IV} در برابر Al^{VI} موجود در کلینوپیروکسن‌های اسپسارتیت کال کافی پراکندگی نشان می‌دهند و مشخص می‌کند، پیروکسن‌ها در فشار متوسط و در گستره‌ای از عمق متوسط تا کم و احتمالاً هنگام صعود به وجود آمده‌اند (شکل ۵-۵).

ترسیم نمودار محتوی Al_2O_3 در برابر SiO_2 (Le Bas, 1962) و نمودار محتوی MgO/FeO^* در برابر $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ (Rock, 1991) کلینوپیروکسن‌های اسپسارتیت کال کافی (شکل ۵-۵ و E) نیز دسته‌بندی ماگمایی ساب‌آلکان و کالک‌آلکان را برای ماگمای متبلورکننده پیروکسن‌ها پیشنهاد می‌کند.

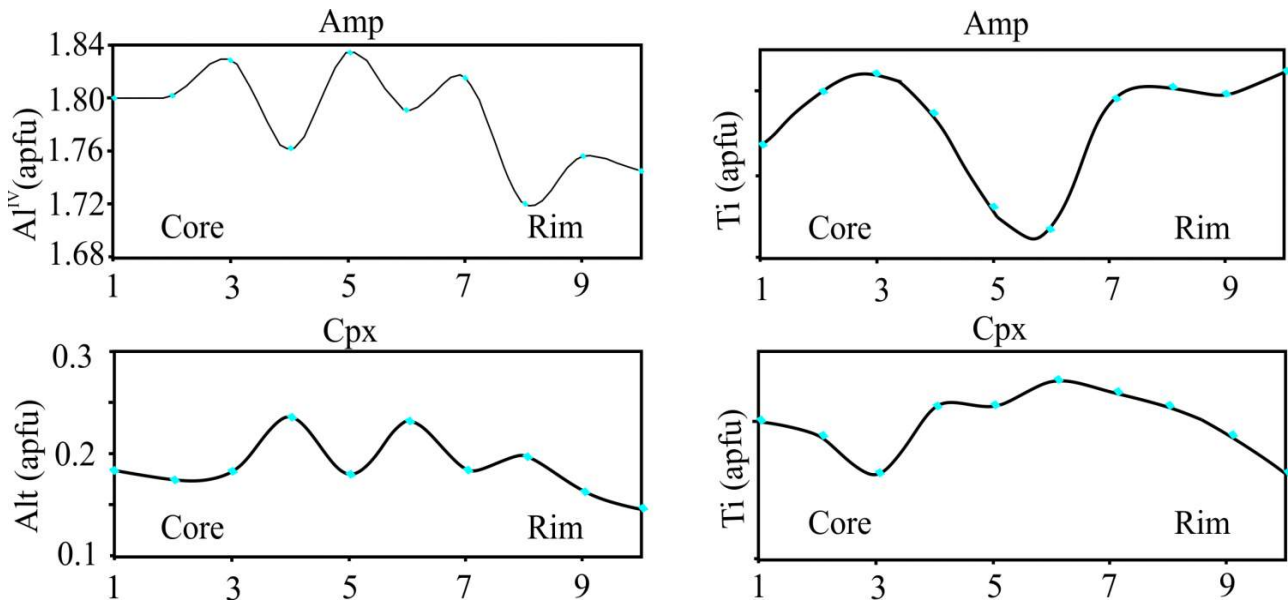
چنان‌که در نمودار Ca در برابر Ti (Sun and Bertrand, 1991) دیده می‌شود کلینوپیروکسن‌های موجود در اسپسارتیت‌های کال کافی در قلمرو بازالت‌های کالک‌آلکان قوس‌های آتشفشانی مرتبط با اسلب فرورونده قرار می‌گیرند و ارتباط سنگ‌های اسپسارتیتی منطقه را با محیط‌های فرورانش نشان می‌دهند (شکل ۵-۵).

بررسی تغییرات عناصر از مرکز به سمت حاشیه طی ده نقطه متوالی با فاصله نسبتاً یکسان در آمفیبول‌های موجود در لمپروفیر کال کافی نشان می‌دهد محتوی عناصر به‌صورت نوسانی تغییر کرده‌اند؛ اما به سمت حاشیه تغییرات در کل کمتر شده است و ترکیب آمفیبول همگن‌تر شده است که دلیلی بر ثابت شدن نسبی شرایط حاکم بر ماگماست (شکل ۶-۵). بررسی تغییرات عناصر از مرکز به سمت حاشیه در پیروکسن‌های موجود در لمپروفیر



شکل ۵. نمودارهای ترکیب شیمیایی آمفیبول و کلینوپیروکسن‌های لمپروفیر کال کافی (شرق انارک، استان اصفهان). A و B: نمودارهای ترسیم محتوی SiO_2 (Wt%) در برابر TiO_2 (Wt%) موجود در آمفیبول‌ها (Rock, 1991)، C و D: نمودارهای ترسیم عنصری پیروکسن (ترسیم Al^{IV} در برابر Al^{VI} (Aoki and Kushiro, 1968) و نمودار Al_2O_3 (Wt%) در برابر SiO_2 (Wt%) (Le Bas, 1962)، E: ترسیم محتوی MgO/FeO^* در برابر $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ کلینوپیروکسن‌ها (Rock, 1991) و F: نمودار Ca در برابر Ti موجود در کلینوپیروکسن (Sun and Bertrand, 1991)

Fig. 5. Chemical composition diagrams of amphibole and clinopyroxene from Kal-e-kafi lamprophyre (East of Anarak, Isfahan province). A and B: SiO_2 vs. TiO_2 diagrams of amphiboles (Rock, 1991), C and D: Plots of pyroxene elemental diagrams, Al^{IV} versus Al^{VI} (Aoki and Kushiro, 1968) and Al_2O_3 versus SiO_2 diagram (Le Bas, 1962). E: MgO/FeO^* versus $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ diagram of clinopyroxene (Rock, 1991), and F: Ca against Ti of clinopyroxene (Sun and Bertrand, 1991)



شکل ۶. نمودارهای تغییرات شیمیایی از مرکز به سمت حاشیه در فنوکریست‌های آمفیبول (Amp) موجود در لمپروفیر کال‌کافی (شرق انارک، استان اصفهان) و فنوکریست‌های پیروکسن‌های (Cpx) موجود در لمپروفیر کال‌کافی (شرق انارک، استان اصفهان)

Fig. 6. Chemical variation diagrams of amphibole (Amp) phenocrysts from Kal-e-kafi lamprophyre (East of Anarak, Isfahan province) and clinopyroxene (Cpx) phenocrysts from Kal-e-kafi lamprophyre (East of Anarak, Isfahan province)

در لمپروفیر کال‌کافی انتخاب شد. در این روش ترکیب آمفیبول بر اساس ۱۳ کاتیون و مجموع $Al^{[4]}$ و $Al^{[6]}$ و دمای تبلور محاسبه شده از روش فمینیاس و همکاران (Femenias et al., 2006) برای بارومتري استفاده شد. نتایج محاسبات بارومتري آمفیبول موجود در لمپروفیر کال‌کافی با استفاده از روش یادشده محدوده فشار ۱/۵ تا ۳/۰ کیلو بار و به‌طور میانگین ۲/۴ کیلو بار را به‌دست می‌دهد.

فمینیاس و همکاران (Femenias et al., 2006) یک ترمومتر قابل استفاده برای آمفیبول‌های حرارت بالا ($T > 700^\circ C$) در ماگمای کالک‌آلکالن غنی از Ti پیشنهاد کردند:

$$\ln[Ti]_{\text{amphibole}} \frac{2603}{T} = -1.70$$

این ترمومتري نشان می‌دهد که آمفیبول‌ها در دمای بین ۸۵۰ تا ۸۹۱ درجه سانتی‌گراد و به‌طور متوسط در دمای ۸۶۰ درجه سانتی‌گراد متبلور شده‌اند.

اوتن (Otten, 1984) ترمومتري بر اساس محتوی Ti (apfu) پیشنهاد کرده است که بر مبنای آن آمفیبول‌های موجود در

افزایش محتوی Al^{IV} و Na_A مرتبط با افزایش دما هستند؛ حالی که محتوی Al^{VI} و Na_B مرتبط با فشار هستند (Baziotis et al., 2012). اندرسون و اسمیت (Anderson and Smith, 1995) محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد را در نظر گرفتند و با بازنگری روابط بارومتري قبلی و دخالت تأثیر دما در بارومتري، رابطه زیر را ارائه کردند:

$$P (\pm 0.6 \text{ kbar}) = 4.76 Al (\text{total}) - 3.01 - \left\{ \frac{T (^\circ C) - 675}{85} \right\} * \{0.530 Al + 0.005294 [T (^\circ C) - 675]\}$$

این کالیبراسیون علاوه بر ترکیب آمفیبول به مقدار دما نیز وابسته است. وقتی دما از ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد به میزان قابل توجهی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (Anderson and Smith, 1995). از بین بارومترهای تجربی پیشنهاد شده برای تعیین فشار تبلور مذاب‌های کالک‌آلکالن با توجه به دمای بالای به‌دست آمده برای آمفیبول‌های موجود در لمپروفیر کال‌کافی و دقت بالا و قابل استفاده بودن بارومتر پیشنهادی اندرسون و اسمیت (Anderson and Smith, 1995) در دماهای بالا، این بارومتر برای تعیین فشار تبلور آمفیبول موجود

دارای محتوی $0.2 > \text{Na}^{\text{A}}(\text{apfu})$ و $0.8 < \text{Al}^{\text{VI}}(\text{apfu})$ و $0.6 > \text{Si} > 0.7$ و محتوی آنورتیت پلاژیوکلاز کمتر از 0.9 باشد، توصیف کردند. شرایط این ترمومتر با آمفیبول و پلاژیوکلازهای موجود در لمپروفیر کال کافی همخوانی دارد. این بارومتر برای محاسبه نیاز به تخمین فشار دارد که بدین منظور از فشارهای به دست آمده در روش اندرسون و اسمیت (Anderson and Smith, 1995) استفاده شد.

ترمومتری با استفاده از این روش و استفاده از آنالیز نزدیک به حاشیه فنوکریستهای پلاژیوکلاز و هورنبلند، دمای تعادل بین این دو فاز را بین 856 تا 874 درجه سانتی گراد و به طور متوسط 860 درجه سانتی گراد، در فشار متوسط $2/0$ کیلوبار به روش اندرسون و اسمیت (Anderson and Smith 1995) به دست می دهد.

تخمین عمق تشکیل

ریدولفی و همکاران (Ridolfi et al., 2010) نمودار ترکیبی دما-عمق و فشار را برای آمفیبولهای مناطق مختلف ارائه کرد که در این نمودار اعماق مختلف بر اساس لرزه نگاری ترسیم شده است. مایر (Mayer, 2013) نیز با استفاده از محدوده های مشخص شده توسط پژوهشگران مختلف، یک نمودار فشار و عمق ترسیم کرد. برای درک بهتر عمق تشکیل واحدهای لمپروفیری کال کافی نتایج ترموبارومتری های آمفیبول و پیروکسن در این نمودارها ترسیم شدند. آمفیبولها در روش اندرسون و اسمیت (Anderson and Smith, 1995) محدوده فشار بین $1/5$ تا $3/0$ کیلوبار و فشار میانگین $2/4$ کیلوبار را به دست می دهند که با اعماق حدود 6 تا 11 کیلومتر مطابقت دارند (شکل C-7). پیروکسنها دمای 1150 درجه سانتی گراد و شرایط فشار 2 تا 5 کیلوبار را نشان می دهند که با اعماق 7 تا 17 کیلومتر مطابقت می کند (شکل C-7).

با توجه به شکل D-7 منشأ ماگمای سازنده این آمفیبول و کلینوپیروکسنها یک اسپینل لرزولیت است که آمفیبولها در شرایط اشباع از مواد فرار و CO_2 و کلینوپیروکسنها در دماهای

لمپروفیر کال کافی دمای 854 تا 900 درجه سانتی گراد و میانگین دمایی 886 درجه سانتی گراد را نشان می دهد.

ترموبارومتری کلینوپیروکسن

ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن منعکس کننده عمق و دمای تبلور آن است (Soesoo, 1997). سوئسو (Soesoo, 1997) بر اساس داده های تجربی و به کارگیری روش های آماری چند متغیره یک فضای P-T تجربی با استفاده از ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن های متبلور شده از ماگمای بازیک ارائه کرد. در این روش، میدان های فشار و دمای تجربی بر روی بردارهای X_{PT} و Y_{PT} ترسیم می شود که بردارهای مذکور به روش زیر محاسبه می شوند:

$$X_{\text{PT}} = 0.446\text{SiO}_2 + 0.187\text{TiO}_2 - 0.404\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.346\text{FeO}(\text{tot}) - 0.052\text{MnO} + 0.309\text{MgO} + 0.431\text{CaO} - 0.446\text{Na}_2\text{O}$$

$$Y_{\text{PT}} = -0.369\text{SiO}_2 + 0.535\text{TiO}_2 - 0.317\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.323\text{FeO}(\text{tot}) + 0.235\text{MnO} - 0.516\text{MgO} - 0.167\text{CaO} - 0.153\text{Na}_2\text{O}$$

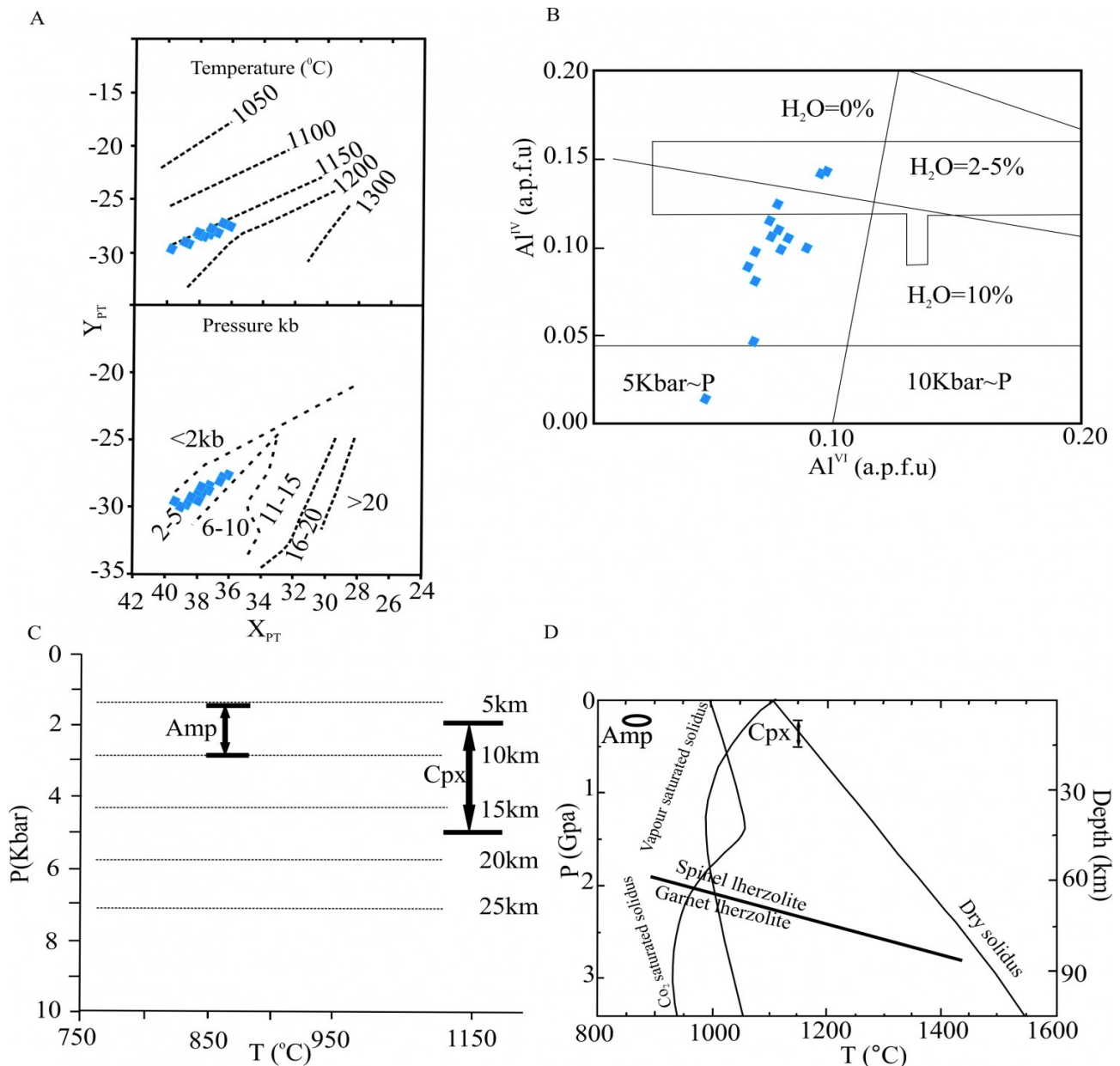
با توجه به پژوهش سوئسو (Soesoo, 1997) و استفاده از نمودار و روابط ارائه شده، پیروکسن های موجود در لمپروفیر کال کافی در دمای 1150 درجه سانتی گراد و فشار 2 تا 5 کیلوبار متبلور شده اند (شکل A-7).

توزیع آلومینیوم در موقعیت های تترائدری و اکتائدری کلینوپیروکسنها معیاری مناسب برای تخمین میزان فشار حاکم بر محیط تشکیل سنگ های آذرین است (Helz, 1973). چنان که در شکل B-7 ملاحظه می شود، در تمامی نمونه های آنالیز شده مقدار Al^{VI} کمتر از 0.1 است که نشانه تبلور این کانیها در فشار کمتر از 5 کیلوبار با محتوای آب ماگما در حدود 10 درصد است.

ترموبارومتری پلاژیوکلاز - هورنبلند

ترکیب کانی های همزیست متعادل به هم وابسته هستند. هولاند و بلاندی (Holland and Blundy, 1994) ترموبارومتر زوج کانی همزیست Plagioclase-Hornblende را با شرایط دمایی 400 تا 900 درجه سانتی گراد به طوری که آمفیبولها

بالتر، شرایط نسبتاً خشک با مواد فرار و CO_2 کمتر به وجود آمده‌اند.



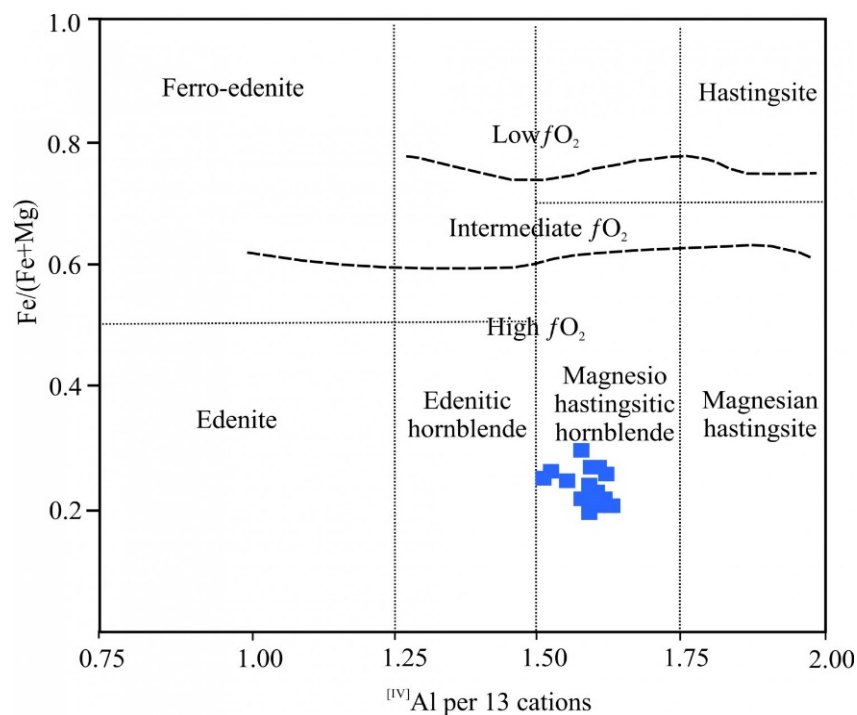
شکل ۷. A: ترموبارومتري کلينوپيروکسن‌های موجود در لمپروفير کال کافي (شرق انارک، استان اصفهان) (after Soesoo, 1997)، B: توزيع Al در موقعيت‌های تتراهدری و اکتاهدري کلينوپيروکسن‌ها به تناسب فشار و مقدار درصد آب ماگما (Helz, 1973)، C و D: ترسيم عمق تبلور با توجه به فشار و دمای به دست آمده از پيروکسن و آمفیبول‌های موجود در لمپروفير کال کافي (شرق انارک، استان اصفهان) (C: نمودار برگرفته از ريدولفی و همکاران (Ridolfi et al., 2010) و D: نمودار برگرفته از ماير (Mayer, 2013))

Fig. 7. A: Clinopyroxene thermobarometry of Kal-e-kafi lamprophyre (East of Anarak, Isfahan province) (after Soesoo 1997), B: Distribution of Al^{VI} vs. Al^{IV} in relation with pressure and water content of the magma (Helz, 1973), C and D: Evaluation of depth by estimated temperature and pressure of clinopyroxene and amphibole from Kal-e-kafi lamprophyres (East of Anarak, Isfahan province), (C: After Ridolfi et al. (2010), D: After Mayer (2013))

فوگاسیته اکسیژن

دانستن وضعیت فوگاسیته اکسیژن و ترکیب سیال در بررسی پتروژنز و توانایی کانه‌زایی ماگما ضروری است (Moretti & Baker, 2008). بارومتر Al در هورنبلند به تغییرات fO_2 و دما حساس است و با افزایش fO_2 نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ به‌طور مستقل از نسبت Fe/Mg سنگ کل به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد (Anderson and smith, 1995). با توجه به

محتوی Al (a.p.f.u) و نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ موجود در آمفیبول‌های اسپسارتیت کال کافی می‌توان گفت این دسته از سنگ‌ها در شرایط فوگاسیته بالای اکسیژن تشکیل شده‌اند که این افزایش فوگاسیته اکسیژن می‌تواند باعث کاهش فشار تبلور (Anderson and smith, 1995) آمفیبول‌های موجود در لمپروفیر کال کافی شده باشد (شکل ۸).



شکل ۸. ترکیب هورنبلند و فوگاسیته اکسیژن اسپسارتیت کال کافی (شرق انارک، استان اصفهان) در نمودار Al در برابر $Fe/(Fe + Mg)$ برگرفته از اندرسون و اسمیت (Anderson and Smith, 1995). خطوط تقسیم‌بندی مربوط به لیک و همکاران (Leake et al., 1997) است.

Fig. 8. Hornblende composition and Oxygen fugacity of Kal-e-kafi Spessartite (East of Anarak, Isfahan province) in Al vs. $Fe/(Fe+Mg)$ diagram (Anderson and Smith, 1995). Subdivision lines are from (Leake et al., 1997).

بررسی مذاب با توجه به منطقه‌بندی کانی‌ها

بررسی تغییرات عناصر از مرکز به سمت حاشیه در آمفیبول و کلینوپیروکسن‌های موجود در لمپروفیر کال کافی تغییرات نوسانی از مرکز به سمت حاشیه کانی را نشان می‌دهند (شکل ۶- A و B). این نوع منطقه‌بندی می‌تواند دلایل متعددی داشته باشد که در دو قالب کلی عوامل خارجی شامل تغییرات مکانیکی و

فیزیکی کل سیستم که مستقل از تبلور است مثل جریان همرفتی، ته‌نشست بلوری و ... و عوامل داخلی شامل بازخورد بین رشد بلوری و انتشار می‌توان بیان کرد (Shore and Fowler, 1996). فمینیاس و همکاران (Femenias et al., 2006) تغییر نوسانی برخی عناصر همچون TiO_2 و Al_2O_3 را نشان‌دهنده تبلور در حین صعود و تغییرات فشار می‌دانند.

اسلب فرورونده به‌طور ذاتی تهی از HFSE است و Nb تهی‌شدگی بیشتری نسبت به Ti و Zr دارد. بنابراین آنومالی منفی عناصر HFSE می‌تواند مربوط به سیالات متاسوماتیزکننده که از آب‌زدایی پوسته اقیانوسی و رسوبات حاصل می‌شوند، باشد (Coltorti et al., 2007). به‌عبارت دیگر می‌توان بیان داشت که آنومالی منفی عناصر HFSE در فنوکریست‌های اسپساریت کال کافی نشان می‌دهد اسلب فرورونده در تشکیل مذاب مولد این فازها دخالت داشته است.

ضریب توزیع کلینوپیروکسن / مذاب

ژئوشیمی‌دان‌ها توزیع عناصر نادر بین فازهای همزیست را به‌وسیله یک ضریب توزیع بیان می‌کنند که مربوط به غلظت عناصر در دو فاز متفاوت است. ضریب توزیع معمولاً برای مشخص کردن توزیع تعادل عناصر نادر بین بلور و ماگما طی تفریق استفاده می‌شود. در روش ارائه‌شده توسط وود و بلاندی (Wood and Blundy, 1997) که مدل پیش‌بینی چگونگی توزیع REE بین کلینوپیروکسن و مذاب سیلیکاته بی‌آب است، می‌توان با استفاده از مقادیر اکسید عناصر اصلی کلینوپیروکسن، دما، فشار و $Mg\#$ مذاب در حال تعادل با کلینوپیروکسن را به‌دست آورد و سپس ضریب توزیع عناصر نادر خاکی سه ظرفیتی و ایتروم بین کلینوپیروکسن و مذاب را محاسبه کرد. در این روش، تغییرات مقدار $Kd_{Cpx/melt}$ با تغییرات مقدار دما و فشار رابطه عکس و با $Mg\#$ مذاب رابطه مستقیم دارد. سان و لیانگ (Sun and Liang, 2012) نیز با توجه به مقادیر اکسید عناصر اصلی کلینوپیروکسن، دما و محتوی آب مذاب در حال تعادل با کلینوپیروکسن، روشی برای محاسبه ضریب توزیع عناصر نادر خاکی سه ظرفیتی و ایتروم بین کلینوپیروکسن و مذاب ارائه کردند. در این روش ضریب توزیع انطباق مثبتی با آلومینیوم تتراهدرال و مقدار Mg در موقعیت M2، و انطباق منفی با دما و محتوی آب مذاب دارد. با توجه به مقادیر Kd کلینوپیروکسن و نیز داشتن مقدار عناصر نادر خاکی درون کلینوپیروکسن (که به‌روش LA-ICP-MS به‌دست آمده

با توجه به مطالب بالا و ترکیب شیمیایی خاص لمپروفیرها، محتوای بسیار متغیر H_2O و CO_2 لمپروفیرها (Woolley et al., 1996) و مقادیر متغیر TiO_2 و Al_2O_3 پیروکسن‌های موجود در لمپروفیر کال کافی و نبود شواهد اختلاط ماگمایی می‌توان زونینگ نوسانی را به تغییرات فشار در حین صعود، نوسانات فشار بخار آب و تغییرات شدید فوگاسیته اکسیژن نسبت داد.

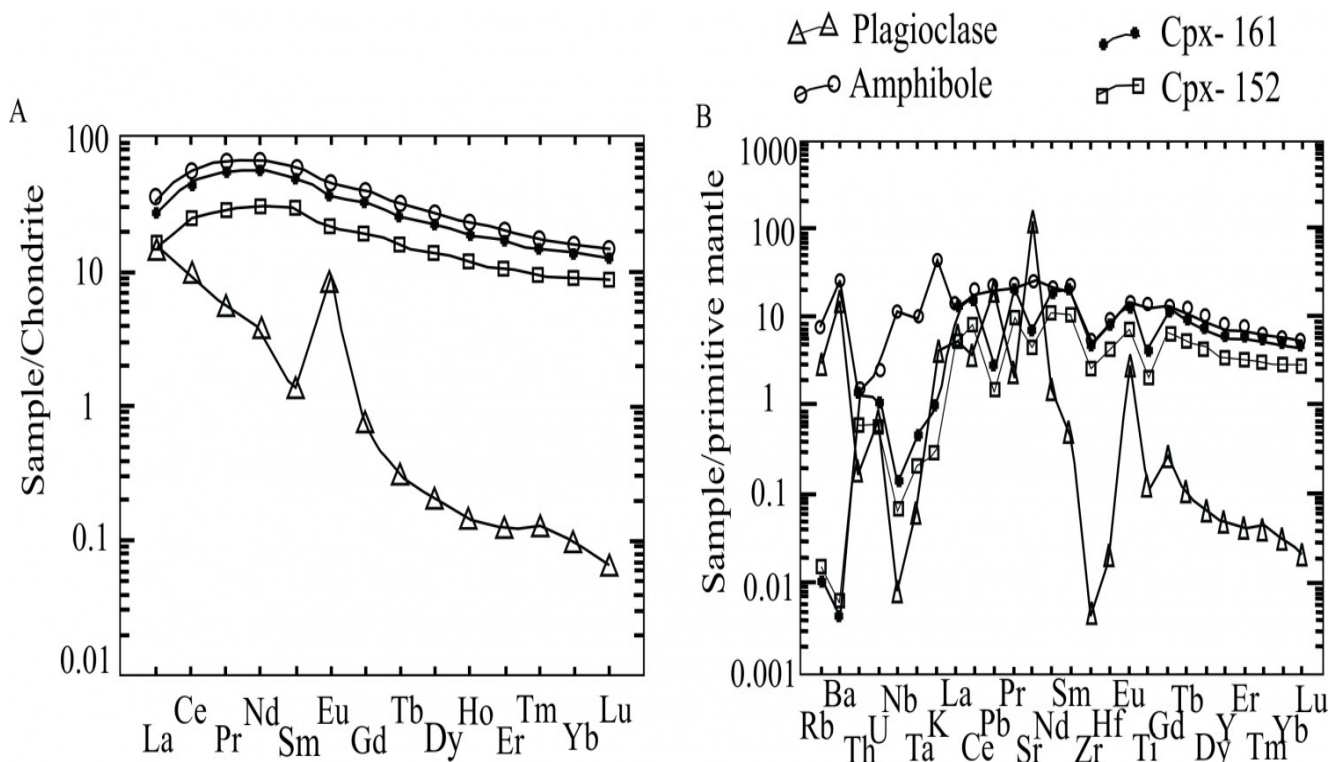
بررسی عناصر کمیاب

مقدار عناصر اصلی، فرعی و کمیاب کانی‌ها که توسط EPMA و LA-ICP-MS آنالیز شده‌اند، در جدول ۲ آورده شده است. در نمودار به‌هنجارسازی عناصر نادر خاکی نسبت به کندریت، پیروکسن‌ها و آمفیبول اسپساریت کال کافی تحذب مشخصی از خود نشان می‌دهند که به‌علت مقدار کمتر LREE‌ها نسبت به MREE‌هاست (شکل ۹-۹). این نمودار نشان می‌دهد که مقدار عناصر نادر خاکی آمفیبول‌ها بیشتر از کلینوپیروکسن‌ها است و پلاژیوکلازها کمترین مقدار عناصر نادر خاکی را با آنومالی مثبت مشخصی از Eu از خود نشان می‌دهند. در نمودار به‌هنجارسازی عناصر این کانی‌ها نسبت به گوشته اولیه نیز فراوانتر بودن مقدار عناصر در آمفیبول نسبت به کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز به‌خوبی مشخص است (شکل ۹-۱۰). بیشترین مقدار Sr متعلق به پلاژیوکلازها بوده و آنومالی منفی عناصر HFSE مانند Pb , Ti , Zr , Hf , Sr , Ba , Nb در کلینوپیروکسن به‌خوبی قابل تشخیص است. آمفیبول‌ها تمرکز بالاتری از عناصر Sr , Ta , Nb , Ba نسبت به پیروکسن‌ها دارند. Nb عنصر بسیار مناسبی برای تفکیک آمفیبول‌های مربوط به زون سابد اکشن از انواع درون صفحات است، به طوری که آمفیبول‌های بالای زون فرورانش میزان Nb کمتر از ۱۰ ppm دارند (Coltorti et al., 2007). مقدار Nb آمفیبول لمپروفیر کال کافی ۸۳۰۷ ppm است که بیانگر ارتباط با فرورانش است.

آمفیبول، پیروکسن و پلاژیوکلاز مشخصات خود را از اسلب فرورونده به ارث می‌برند بدین معنی که سیالات آزاد شده از

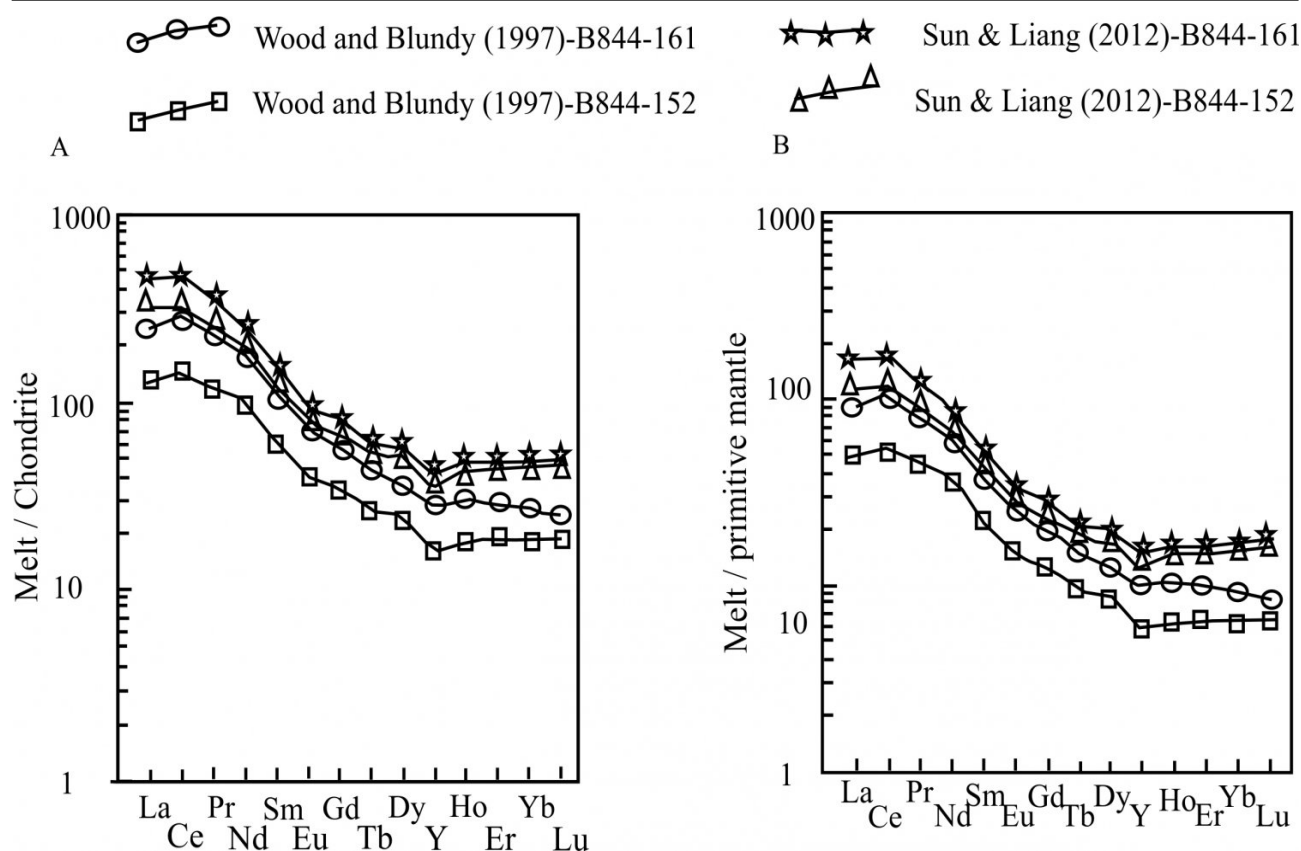
کلینوپیروکسن ترجیح می‌دهد؛ بنابراین مقدار آن در مذاب همزیست با کلینوپیروکسن بیشتر خواهد بود. به‌هنجارسازی ترکیب مذاب همزیست با کلینوپیروکسن نسبت به کندریت (شکل ۱۰-A) و گوشته اولیه (شکل ۱۰-B) نموداری با شیب کاهشی و سه قسمتی (LREE, MREE, HREE) به‌دست می‌دهد (شکل ۱۰). این نمودارها نشان می‌دهند که مذاب سازنده این سنگ‌ها محتوی بالای از LREE داشته و در ایجاد آنها آمفیبول نیز نقش داشته است. شیب کاهشی و الگوی تقریباً افقی HREEها در نمودار به‌هنجارسازی به کندریت، تعلق ماگمای سازنده این سنگ‌ها به دسته ماگمایی کالک‌آلکان و سنگ منشأ اسپینل لرزولیت را نشان می‌دهد.

است)، ترکیب عناصر نادر خاکی و عنصر Y در مذاب در حال تعادل با کلینوپیروکسن بر اساس معادله $Kd_{Cpx/melt} = C_i^{Cpx} / C_i^{Melt}$ برای هر عنصر محاسبه می‌شود (جدول ۳). مقدار $Kd_{Cpx/melt}$ کم، بیانگر توزیع بیشتر یک عنصر در مذاب نسبت به کانی (کلینوپیروکسن) است. در کل می‌توان گفت محتوی عناصر نادر خاکی و عنصر Y در مذاب در حال تعادل با کلینوپیروکسن بالاست و با توجه به مقدار $Kd_{Cpx/melt}$ کم کلینوپیروکسن، این عناصر توزیع بیشتری در مذاب نسبت به کلینوپیروکسن داشته‌اند که این امر می‌تواند به دلیل غنی‌بودن سنگ منشأ، درجات ذوب‌بخشی کمتر و تفریق کمتر مذاب باشد. برای مثال $[K_d]_{Yb}^{Cpx/Melt} = 0.50$ (نمونه B844-152) نشان می‌دهد عنصر Yb مانند در مذاب را دو برابر به ورود در



شکل ۹. نمودارهای به‌هنجارسازی عناصر مختلف موجود در آمفیبول، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز لمپروفیر کال کافی (شرق انارک، استان اصفهان). A: نسبت به ترکیب کندریت (McDonough and Sun, 1995) و B: نرمالیز نسبت گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)

Fig. 9. Normalization diagrams of amphibole, clinopyroxene and plagioclase from Kal-e-kafi lamprophyres (East of Anarak, Isfahan province), A: Chondrite normalized (McDonough and Sun, 1995), and B: Primitive mantle-normalized spidergram (Sun and McDonough, 1989)



شکل ۱۰. نمودارهای به‌هنجارسازی ترکیب محاسبه‌شده مذاب همزیست با کلینوپروکسن لمپروفیر کال‌کافی (شرق انارک، استان اصفهان) نسبت به A: کندریت و B: گوشته اولیه

Fig. 10. Normalization of calculated melt composition coexisting with clinopyroxene from Kal-e-kafi lamprophyres (East of Anarak, Isfahan province) to A: Chondrite, and B: Primitive mantle

نتیجه‌گیری

را از ذوب گوشته لیتوسفری در شرایط اشباع از آب و مواد فرار و فوگاسیته بالای اکسیژن به‌وجود آورده باشند. با در نظر گرفتن زمان و موقعیت منطقه مورد بررسی که به حاشیه این خرد قاره بسیار نزدیک است، فرورانش صفحه اقیانوسی پیرامون خرد قاره شرق-ایران مرکزی (افیولیت‌های نایین و عشین) دارای احتمال بیشتری است. با توجه به نتایج بررسی‌های انجام‌شده می‌توان در مورد لمپروفیرهای کال‌کافی تصور کرد که آب‌زدایی اسلب اقیانوسی فرورونده و رسوبات روی آن باعث آزاد شدن سیالات متاسوماتیزکننده شده که گوه گوشته لیتوسفری اسپینل لرزولیتی را تحت تأثیر قرار داده و ذوب کرده است. مذاب حاصل از این پدیده دارای ماهیت کالک‌آلکالن و تشکیل دهنده لمپروفیرهای کال‌کافی بوده است.

لمپروفیرها غالباً مرتبط با فرآیندهای کوه‌زایی هستند؛ زیرا فرورانش صفحه اقیانوسی ممکن است متاسوماتیزم را در گوشته لیتوسفری گسترش دهد و حتی در نواحی که شواهدی از فرآیند فرورانش دیده نمی‌شود، فرآیندهای زمین‌شناسی پیشنهاد می‌کنند که یک اسلب فرورونده قدیمی طی چند صد میلیون سال، گوشته را تحت تأثیر قرار داده است (Gibson et al., 1995). در مورد سنگ‌های لمپروفیری منطقه کال‌کافی می‌توان گفت فرورانش اقیانوس نئوتیس در راستای تراست زاگرس و فرورانش صفحه اقیانوسی پیرامون خردقاره شرق-ایران مرکزی می‌تواند گوشته را تحت تأثیر قرار داده و سنگ‌های لمپروفیری

جدول ۲. نتایج آنالیز LA-ICP-MS و میکروپروب کلینوپیکسین، پلاژیوکلاز و آمفیبول موجود در لمپروفیر کال کافی (شرق انارک، استان اصفهان)

Table 2. LA-ICP-MS and EPMA analyses of clinopyroxene, plagioclase and amphibole from Kal-e-kafi lamprophyre (East of Anarak, Isfahan province)

Sample	B844			
Point	152	161	153	151
Mineral	CPX	CPX	Plg	Amp
SiO ₂	52.76	50.08	48.51	42.21
TiO ₂	0.43	0.83	0.02	2.59
Al ₂ O ₃	2.48	5.37	32.90	12.69
FeO*	7.10	8.55	0.47	12.16
MnO	0.22	0.25	0.00	0.18
MgO	14.54	13.16	0.04	12.97
CaO	21.93	21.31	15.93	11.53
NiO	0.00	0.01	0.00	0.00
Na ₂ O	0.29	0.46	2.13	2.31
K ₂ O	0.01	0.03	0.11	1.32
Total	99.76	100.04	100.12	97.97
Li	22.151	23.836	8.048	2.138
Rb	0.010	0.007	1.780	4.873
Sr	95.455	115.360	2357.600	521.350
Y	15.223	26.017	0.227	30.700
Zr	28.605	52.621	0.044	53.446
Nb	0.045	0.088	0.005	8.307
Ba	0.042	0.030	112.510	182.940
La	3.560	6.694	3.848	8.410
Ce	15.145	30.736	6.160	34.108
Pr	2.687	5.164	0.531	5.873
Nd	14.633	27.344	1.766	31.573
Sm	4.276	7.734	0.194	8.771
Eu	1.197	2.116	0.490	2.516
Gd	3.916	6.769	0.137	8.067
Tb	0.559	0.928	0.011	1.091
Dy	3.454	5.573	0.048	6.692
Ho	0.639	1.046	0.008	1.246
Er	1.652	2.717	0.020	3.184
Tm	0.221	0.368	0.003	0.418
Yb	1.474	2.310	0.016	2.686
Lu	0.216	0.309	0.002	0.352
Hf	1.267	2.360	0.006	2.235
Ta	0.008	0.019	0.002	0.383
Pb	0.238	0.467	3.680	3.561
Th	0.053	0.127	0.013	0.108
U	0.012	0.024	0.012	0.053

جدول ۳. مقادیر Kd عناصر نادر خاکی و Y محاسبه شده کلینوپیروکسن‌های لمپروفیر کال کافی (شرق انارک، استان اصفهان) و ترکیب مذاب همزیست (M = مذاب همزیست). در این جدول:

$$K^{Cpx}_{Fe-Mg} = 0.109 + 0.186 \cdot Mg\#_{Cpx} \text{ and } Mg\#_{melt} = (K^{Cpx}_{Fe-Mg} \cdot Mg\#_{Cpx}) / [1 - Mg\#_{Cpx} + (K^{Cpx}_{Fe-Mg} \cdot Mg\#_{melt})] \text{ (Wood and Blundy, 1997).}$$

Table 3. Calculated Kd of REEs and Y of Kal-e-kafi lamprophyres (East of Anarak, Isfahan province) clinopyroxene and coexisting basaltic melt (M = Basaltic melt), in this table: $K^{Cpx}_{Fe-Mg} = 0.109 + 0.186 \cdot Mg\#_{Cpx}$ and $Mg\#_{melt} = (K^{Cpx}_{Fe-Mg} \cdot Mg\#_{Cpx}) / [1 - Mg\#_{Cpx} + (K^{Cpx}_{Fe-Mg} \cdot Mg\#_{melt})]$ (Wood and Blundy, 1997).

Method	Cpx composition		K _d (Wood & Blundy, 1997)		K _d (Sun and Liang, 2012)		Basaltic melt (Wood & Blundy, 1997)		Basaltic melt (Sun and Liang, 2012)	
	B844-152	B844-161	B844-152	B844-161	B844-152	B844-161	B844-152	B844-161	B844-152	B844-161
H ₂ O _M (wt%)					10	10				
Mg# _M			0.482	0.444						
La	3.560	6.693	0.113	0.109	0.046	0.063	31.509	61.670	76.603	105.655
Ce	15.145	30.736	0.171	0.166	0.077	0.106	88.525	184.956	196.121	290.390
Pr	2.687	5.164	0.243	0.239	0.118	0.163	11.046	21.614	22.813	31.757
Nd	14.633	27.344	0.325	0.323	0.165	0.230	44.977	84.651	88.524	118.765
Sm	4.276	7.734	0.471	0.476	0.247	0.351	9.087	16.246	17.305	22.037
Eu	1.197	2.116	0.522	0.533	0.273	0.391	2.291	3.971	4.387	5.406
Gd	3.916	6.769	0.562	0.577	0.288	0.418	6.971	11.724	13.581	16.189
Tb	0.559	0.928	0.585	0.606	0.292	0.428	0.955	1.531	1.914	2.167
Dy	3.454	5.573	0.591	0.617	0.283	0.421	5.843	9.031	12.183	13.234
Y	15.223	26.017	0.586	0.615	0.273	0.408	25.977	42.331	55.793	63.682
Ho	0.639	1.046	0.581	0.611	0.266	0.400	1.010	1.712	2.401	2.614
Er	1.652	2.717	0.559	0.592	0.244	0.371	2.953	4.590	6.777	7.326
Tm	0.220	0.368	0.531	0.565	0.220	0.338	0.414	0.651	1.001	1.089
Yb	1.474	2.310	0.500	0.534	0.196	0.305	2.951	4.324	7.511	7.572
Lu	0.215	0.309	0.468	0.503	0.175	0.274	0.459	0.614	1.230	1.126

بررسی شیمی آمفیبول و کلینوپیروکسن‌ها لمپروفیر بودن و ماهیت کالک آلکالن را برای سنگ‌های دربردارنده این آمفیبول‌ها آشکار می‌کند. محتوی Al₂O₃ و TiO₂ موجود در کلینوپیروکسن اسپساریت کال کافی، گستره‌ای تدریجی از خود نشان می‌دهند که بیانگر تبلور این کانی‌ها در حین صعود است. ترموبارومتري آمفیبول موجود در لمپروفیرهای کال کافی با استفاده از روش پیشنهادی فمینیاس و همکاران (Femenias et al. 2006) و اوتن (Otten, 1984) به ترتیب دمای میانگین ۸۶۰

لمپروفیرهای مزوکرات کال کافی که به صورت دایک و استوک دیده می‌شوند، بر اساس بررسی‌های پتروگرافی و با توجه به تقسیم‌بندی‌های موجود برای لمپروفیرها، متعلق به لمپروفیرهای کالک آلکالن و از نوع اسپساریت هستند. این لمپروفیرها دارای فنوکریست‌های هورنبلند غالباً از نوع مگنزیوهایستینگریت، پیروکسن از نوع دیوسید و پلاژیوکلاز با ترکیب لابرادوریت تا بیتونیت در یک زمینه دانه‌ریز تا دانه متوسط شامل همان کانی‌ها و ارتوکلاز، آپاتیت، مگنتیت، کلریت و اپیدوت هستند.

سنگ‌ها دارای ماهیت کالک آلکالن بوده و از ذوب بخشی یک اسپینل لرزولیت گوشته لیتوسفری ایجاد شده است. برداشت کلی از بررسی‌های پتروگرافی، فشارسنجی و شیمی فنوکریست‌های تشکیل دهنده لمپروفیر کال کافی نشان می‌دهد که سیالات متاسوماتیز کننده حاصل از اسلب فرورونده باعث ذوب گوشته لیتوسفری اسپینل لرزولیتی در اعماق بالاتر از ۱۷ کیلومتر شده است. پیروکسن‌ها اولین کانی فنوکریست متبلور شده از ماگمای به وجود آمده در دماهای بالاتر، شرایط نسبتاً خشک با مواد فرار و CO₂ کمتر بوده‌اند. پس از آن پلاژیوکلازهای بازیک و آمفیبول‌ها تبلور به دست آورده‌اند که آمفیبول‌ها در شرایط اشباع از مواد فرار و CO₂ متبلور شده‌اند. تبلور این فنوکریست‌ها در حین صعود ماگما نیز ادامه داشته است و در نهایت مواد زمینه‌ای متبلور شده‌اند. مقدار عناصر کمیاب و نادر خاکی موجود در کلینوپیروکسن‌ها که به ازای کاهش فشار، با افزایش قابل ملاحظه‌ای همراه هستند نیز دلیلی بر تبلور ماگما در حین صعود است.

قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مالی دانشگاه اصفهان و همچنین پیشنهادها و نظرهای ارزنده داوران محترم تشکر می‌نمایند.

و ۸۸۶ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۵ تا ۳/۰ کیلوبار با استفاده از روش اندرسون و اسمیت (Anderson and Smith, 1995) را نشان می‌دهد. پیروکسن‌های موجود در لمپروفیر کال کافی دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲ تا ۵ کیلوبار را نشان می‌دهند. فشارهای به دست آمده اعماق ۷ تا ۱۷ کیلومتر را برای تبلور کلینوپیروکسن‌ها و ۶ تا ۱۱ کیلومتر را برای تبلور آمفیبول‌ها نشان می‌دهند. دمای تعادل زوج کانی همزیست آمفیبول- پلاژیوکلاز با استفاده از روش پیشنهادی هولاند و بلاندی (Holland and Blundy, 1994) به طور متوسط ۸۶۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است. آمفیبول و کلینوپیروکسن‌های موجود در اسپسارتیت کال کافی زونینگ نوسانی از خود نشان می‌دهند که می‌تواند به علت تغییرات فشار در حین صعود، نوسانات فشار بخار آب و تغییرات شدید فوگاسیته اکسیژن باشد.

بررسی عناصر نادر خاکی موجود در فنوکریست‌های اسپسارتیت کال کافی نشان می‌دهد این عناصر در آمفیبول‌ها بیشترین و در پلاژیوکلازها کمترین مقدار را دارا هستند و مقدار عناصر کمیاب و نادر خاکی در کلینوپیروکسن‌ها به ازای کاهش فشار، با افزایش قابل ملاحظه‌ای همراه است. محاسبه ترکیب مذاب متبلور کننده کلینوپیروکسن‌ها نشان می‌دهد که مذاب سازنده این

References

- Ahmadian, J., Hasckke, M., Mc Donald, I., Regelous, M., Ghorbani, M.R., Emami, M.H. and Murata, M., 2009. High magmatic flux during Alpine-Himalayan collision: Constraints from the Kal-e-kafi complex, central Iran. *Geological Society of America*, 121(5): 857-868.
- Ahmadian, J., Sarjoughian, F., Lentz, D., Esna-Ashari, A., Murata, M. and Ozawa, H., 2016. Eocene K-rich adakitic rocks in the Central Iran: Implications for evaluating its Cu-Au-Mo metallogenic potential. *Ore Geology Reviews*, 72(1): 323-342.
- Aistov, L., Melnikov, B., Krivyakin, B. and Morozov, L., 1984. *Geology of the Khur area* (central Iran), Geological Survey of Iran, Tehran, TE Report 20, 131 pp.
- Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East, Scale 1:5000000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Anderson, J.L. and Smith, D.R., 1995. The effects of temperature and Oxygen fugacity on the Al-in-hornblende barometer, *American Mineralogist*, 80 (5-6): 549-559.
- Aoki, K.I., and Kushiro, I., 1968. Some clinopyroxenes from ultramafic inclusions in Dreiser Weiher, Eifel. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 18(4): 326-337.
- Bahadoran, N., 2007. Petrology and geochemistry of volcanic rocks in west of the Arousan-e - Kaboudan area (south of Choupanan - North east of Esfahan). M.Sc. Thesis, University of

- Esfahan, Esfahan, Iran, 120 pp. (in Persian with English abstract)
- Bayat, F. and Torabi, G., 2011. Alkaline lamprophyric province of Central Iran. *Island Arc*, 20(3): 386 – 400.
- Baziotis, I., Mposkos, E. and Leontakianakos, G., 2012. Amphibole chemistry from the Penteli metamorphic core complex: implication for the metamorphic evolution of eastern Attica. First European Mineralogical Conference, Frankfurt, Germany.
- Coltorti, M., Bonadiman, C., Faccini, B., Grégoire, M.O., Reilly, S.Y. and Powell, W., 2007. Amphiboles from suprasubduction and intraplate lithospheric mantle. *Lithos*, 99(1-2): 68-84.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1996. An introduction to the rock-forming minerals. Longman, London, United Kingdom, 696 pp.
- Femenias, O., Mercier, J.C., Nkono, C., Diot, H., Berza, T., Tatu, M. and Demaiffe, D., 2006. Calcic amphibole growth and compositions in calc-alkaline magmas: Evidence from the Motru Dike Swarm (Southern Carpathians, Romania). *American Mineralogist*, 91(1): 73-81.
- Gibson, A.S., Thompson, R.N., Dickin, A.P. and Leonardos, O.H., 1995. High-Ti and low-Ti mafic potassic magmas: key to plume-lithosphere interactions and continental flood-basalt genesis. *Earth Planetary Science Letters*, 136(3): 149–165.
- Hammarstrom, J.M. and Zen, E.A., 1986. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, 71(11-12): 1297-1313.
- Helz, R.T., 1973. Phase relations of basalts in their melting ranges at $p_{H_2O} = 5$ kb as a function of Oxygen fugacity, Part I. Mafic phases. *Journal of Petrology*, 14(2): 249-302.
- Holland, T. and Blundy, J., 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116(4): 433-447.
- Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H. and Sisson, V.B., 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*, 72(3-4): 231–239.
- Ishida, Y., Morishita, T., Arai, S. and Shirasaka, M., 2004. Simultaneous in-situ multi-element analysis of minerals on thin section using LA-ICP-MS. *Science Reports of Kanazawa University*, 48(1, 2): 31-42.
- Johnson, M.C. and Rutherford, M.J., 1988. Experimental calibration of an aluminum-in-hornblende geobarometer applicable to calc-alkaline rocks. *Earth and Space Science News*, 69(44):1511.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J.A., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W. and Guo, Y., 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *The Canadian Mineralogist*, 35(1): 219-246.
- Le Bas, M., 2007. Igneous rock classification revisited 4: Lamprophyres. *Geology Today*, 23 (5): 167-168.
- Le Bas, M.J., 1962. The role of Aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science*, 260 (4): 267 - 288.
- Li, Y., 1998. Crystal chemistry, microstructures, and petrologic implication of the amphiboles from the blueschists of Southwestern Oregon. M.Sc. Thesis, Brigham Young University, Utah, United States, 74 pp.
- Mayer, B., 2013. Petrogenesis of hornblende - bearing lavas (Rhön, Germany). Ph.D. Thesis, Hamburg University, Hamburg, Germany, 86 pp.
- McDonough, W.F. and Sun, S.-s., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223 – 253.
- Moretti, R. and Baker, D.R., 2008. Modeling the interplay of fO_2 and fS_2 along the FeS-silicate melt equilibrium. *Chemical Geology*, 256(3-4), 286–298.
- Morimoto, N., Fabrice, J., Ferguson, A., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Akoi, K. and Gottardi, G., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogical Magazine*, 52(367): 535-550.

- Morishita, T., Ishida, Y. and Arai, S., 2005a. Simultaneous determination of multiple trace element compositions in thin (<30 μm) layers of BCR-2G by 193 nm ArF excimer laser ablation-ICP-MS: Implications for matrix effect and elemental fractionation on quantitative analysis. *Geochemical Journal*, 39 (4): 327-40.
- Morishita, T., Ishida, Y., Arai, S. and Shirasaka, M., 2005b. Determination of multiple trace element compositions in thin (<30 μm) layers of NIST SRM 614 and 616 using laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 29(1): 107-22.
- Otten, M.T., 1984. The origin of brown hornblende in the Artssjället gabbros and dolerites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86(2): 189 - 199.
- Ridolfi, F., Renzulli, A. and Puerini, M., 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1): 45-66.
- Rock, N.M.S., 1991. *Lamprophyres*. Blackie and Sons Limited, Glasgow, Scotland, 285 pp.
- Rutherford, M.J., 2008. Magma Ascent rates. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69 (1): 241-271.
- Schmidt, M.W., 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(2-3): 304-310.
- Shore, M. and Fowler, A.D., 1996. Oscillatory zoning in minerals: A common phenomenon. *The Canadian Mineralogist*, 34(6): 1111-1126.
- Simakin, A., Zakrevskaya, O. and Salova, T., 2012. Novel Amphibole geo-barometer with application to mafic xenoliths. *Earth Science Research*, 1(2): 82-97.
- Soesoo, A., 1997. A multivariate statistical analysis of clinopyroxene compositions: empirical coordinates for the crystallization and PT estimations. *Journal of Geological Society of Sweden*, 119(1), 55-60.
- Sun, C. and Liang, Y., 2012. Distribution of REE between clinopyroxene and basaltic melt along a mantle adiabat: Effects of major element composition, water, and temperature. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163(5): 807-823.
- Sun, C.M., Bertrand, J., 1991. Geochemistry of clinopyroxenes in plutonic and volcanic sequences from the Yanbian Proterozoic ophiolites (Sichuan Province, China): petrogenetic and geotectonic implications. *Schweizer Minealogische und Petrographische Mitteilungen*, 71(2): 243-259.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders and M.J. Norry (Editors), *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society, London, pp. 313-345.
- Torabi, G.H., 2009. Late Permian lamprophyric magmatism in North-East of Isfahan Province, Iran: A mark of rifting in the Gondwanaland. *Comptes Rendus Geoscience*, 341(1): 85-94.
- Torabi, G.H., 2010. Early Oligocene alkaline lamprophyric dykes from the Jandaq area (Isfahan Province, Central Iran): Evidence of Central-East Iranian microcontinent confining oceanic crust subduction. *Island Arc*, 19(2): 277-291.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185-187.
- Wood, B.J. and Blundy, J.D., 1997. Predictive model for rare earth element partitioning between clinopyroxene and anhydrous silicate melt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 129(2-3): 166-181.
- Woolley, A.R., Bergman, S.C., Edgar, A.D., Le Bas, M.J., Mitchell, R.H., Rock, N.M.S. and Scott-Smith, B.H., 1996. Classification of lamprophyres, lamproites, kimberlites and the kalsilite mellitic and leucitic rocks. *The Canadian Mineralogist*, 34(2): 175-186.
- Yakovenko, V., Chinakov, I., Kokorin, Yu. and Krivyakin, B., 1981. Report on geological prospecting in Anarak area (Kal-e Kafi- Khuni locality). Moscow, Report No. 13, 293 pp.



Petrogenetic processes, crystallization conditions and nature of the Lower-Oligocene calc-alkaline spessartitic lamprophyres from Kal-e-kafi area (East of Anarak, Isfahan province)

Gholam Hossain Nazari and Ghodrat Torabi*

Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Submitted: June 12, 2015

Accepted: Apr. 6, 2016

Keywords: *Spessartite, Lamprophyre, Calc-alkaline, Oligocene, Kal-e-kafi, Central Iran*

Introduction

Lamprophyres are mesocratic to melanocratic igneous rocks, usually hypabyssal, with a panidiomorphic texture and abundant mafic phenocrysts of dark mica or amphibole (or both) with or without pyroxene, with or without olivine, set in a matrix of the same minerals, and with alkali-feldspar restricted to the groundmass (Woolley et al., 1996). Lamprophyres are frequently associated with orogenic settings and a mantle modified by dehydration of subducted slab (Gibson et al., 1995).

Small outcrops of lamprophyres with Paleozoic to Oligocene age are reported from the central parts of Iran (Torabi 2009 and 2010). The primary magmas of these lamprophyres were derived from decompression melting of the mantle induced by a tensional regime of continental crust (Torabi, 2010). Bayat and Torabi (2011) called the western part of the CEIM (Central-East Iranian Microcontinent) (Anarak to Bayazeh) a "Paleozoic lamprophyric province" and suggested that the lamprophyre magmas were formed by subduction of Paleo-Tethys oceanic crust from the Early to late Paleozoic which resulted in the mantle metasomatism and enrichment.

Lamprophyric dykes and stocks of the Kal-e-kafi area (Central Iran, Northern part of Yazd Block) cross-cut the Eocene volcanic rocks and other older rock units such as Cretaceous limestone. These lamprophyres are mainly composed of

hornblende (magnesio-hastingsite), clinopyroxene (diopside) and plagioclase (labradorite to bytownite) as phenocryst, in a matrix of fine to medium grained of the same minerals and orthoclase, apatite, magnetite, chlorite and epidote.

In this paper that is a report on the first study on the calc-alkaline lamprophyres of Central Iran, the petrography and mineral chemistry of calc-alkaline lamprophyric dykes of the Kal-e-kafi area are discussed.

Materials and methods

Chemical composition of minerals were conducted at Kanazawa University (Kanazawa, Japan) using the wavelength-dispersive electron probe microanalyzer (EPMA) (JEOL JXA-8800R), with 20kV accelerating potential, 20 nA beam current and a counting time of 40 seconds. Natural minerals and synthetic materials were used as standards. The ZAF program was used for data correction. The Fe³⁺ content of minerals was estimated by stoichiometry. The Mg# and Fe# were calculated as $[Mg/(Mg+Fe^{2+})]$, and $[Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)]$ atomic ratio of minerals, respectively.

Trace element values of phenocrystic clinopyroxene, amphibole and plagioclase were analyzed by LA-ICP-MS (laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry) using an ArF 193 nm Excimer Laser coupled to an

Agilent 7500S at the Earth Science Department of the Kanazawa University (Japan). The diameter of the analyzed points was 60 micrometers for clinopyroxene and 120 micrometers for amphibole and plagioclase.

Mineral abbreviations are adopted from Whitney and Evans (2010).

Results and Discussion

Lamprophyres of the Kal-e-kafi area (Central Iran, West of Yazd Block) are exposed as dykes and stocks which cross-cut the Eocene volcanic rocks and other older rock units such as Cretaceous limestone. Field studies indicate that calc-alkaline lamprophyric dykes of the Kal-e-kafi (east of Anarak) are younger than the other igneous rocks.

According to the results of petrography and mineral chemistry, the mesocratic lamprophyres of Kal-e-kafi area are calc-alkaline spessartite.

Unique values of Al_2O_3 and TiO_2 associated with oscillatory zoning of clinopyroxenes reveal the crystallization of clinopyroxenes during ascending of magma.

Plagioclase phenocrysts are labradorite to bytownite in composition and the plagioclases of matrix are labradorite. Chemical composition diversity of plagioclase indicates the fractional crystallization of these lamprophyres.

Amphibole thermometry estimate average temperature of 860°C and barometry by Anderson and Smith (1995) shows 1.5 to 3 kbars pressure. Clinopyroxene thermobarometry calculate 1150 °C temperature and pressure between 2 to 5 kbars. The geochemical features and thermobarometry of the Kal-e-kafi spessartite minerals suggest that the primary lamprophyric magma was derived from partial melting of a lithospheric mantle spinel lherzolite. Changes in values of pressure, water content, and Oxygen fugacity during magma ascending lead to oscillatory zoning minerals.

Based on the mineral chemistry, it can be concluded that the Kal-e-kafi lamprophyres were formed in a subduction-related environment by a calc-alkaline magmatism.

References

- Anderson, J.L. and Smith, D.R., 1995. The effects of temperature and Oxygen fugacity on the Al-in-hornblende barometer, *American Mineralogist*, 80 (5-6): 549-559.
- Bayat, F. and Torabi, G., 2011. Alkaline lamprophyric province of Central Iran. *Island Arc*, 20(3): 386 – 400.
- Gibson, A.S., Thompson, R.N., Dickin, A.P. and Leonardos, O.H., 1995. High-Ti and low-Ti mafic potassic magmas: key to plume-lithosphereinteractions and continental flood-basalt genesis. *Earth Planetary Science Letters*, 136(3): 149–165.
- Torabi, G.H., 2009. Late Permian lamprophyric magmatism in North-East of Isfahan Province, Iran: A mark of rifting in the Gondwanaland. *Comptes Rendus Geoscience*, 341(1): 85–94.
- Torabi, G.H., 2010. Early Oligocene alkaline lamprophyric dykes from the Jandaq area (Isfahan Province, Central Iran): Evidence of Central–East Iranian microcontinent confining oceanic crust subduction. *Island Arc*, 19(2): 277-291.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185-187.
- Woolley, A.R., Bergman, S.C., Edgar, A.D., Le Bas, M.J., Mitchell, R.H., Rock, N.M.S. and Scott-Smith, B.H., 1996. Classification of lamprophyres, lamproites, kimberlites and the kalsilite mellitic and leucitic rocks. *The Canadian Mineralogist*, 34(2): 175-186.