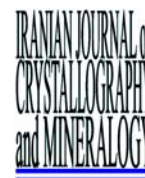


IRANIAN SOCIETY of  
CRYSTALLOGRAPHY  
and MINERALOGY

No. 1, 1385/2006 Spring & Summer



## **Mineral chemistry and whole rock geochemistry evidences of the differentiation in the Karaj Dam basement igneous rocks**

**D. Esmaily, M.V. Valizadeh, Z. Noorolahi, A. Kananian**

*School of Geology, University College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran*

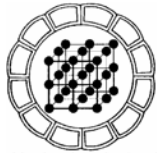
*E-mail: esmaili@khayam.ut.ac.ir*

(Received:26/6/2005, received in revised form:7/2/2006)

**Abstract:** Igneous rocks of the Karaj Dam basement are mainly composed of gabbro, diorite and monzodiorite-monzonite which are locally penetrated by the quartz-monzonitic dikes. The upper and lower margins of the pluton, which has gabbroic composition, show porphyritic texture (chilled margin). The porphyritic texture in chilled margin gradually changes to the equigranular gabbro, diorite and monzodiorite-monzonite. The mineral chemistry (electron microprobe analysis) of the plagioclase and pyroxene in various rock samples from lower contact chilled towards the upper parts suggesting differentiation processes. The  $Mg^{\#}$  of the pyroxene and  $An^{\%}$  of plagioclase of the contact chilled samples can be used as an indication of the original magma and plotted between the gabbro and monzonitic samples. In addition, increasing of the  $Mg^{\#}$  within the whole rock samples from the upper of contact chilled, in comparison to the lower one, suggests elements differentiation by the gravity diffusion. Moreover,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  and incompatible elements increase and  $MgO$ ,  $Fe_2O_3$  (tot),  $CaO$  and compatible elements decrease with the progress of the magma differentiation. The samples in the Log Ni-Log La and Log Ni-Log Zr diagram plot almost as straight horizontal line, which confirms occurrence of the magma differentiation.

**Keywords:** *differentiation, Karaj Dam, mineral chemistry, geochemistry, chilled margin, Iran.*

جهت تهیه فایل **WORD** این مقاله به سایت **DaneshResan.com** مراجعه نمایید و عنوان مقاله را جستجو کنید  
بیش از ۲ میلیون مقاله فارسی در این سایت موجود میباشد



انجمن باورشناسان و کانی شناسان ایران

شماره ۱، بهار و تابستان ۸۵، از صفحه ۱۵۳ تا ۱۷۶

مجله  
باورشناسی  
و کانی شناسی  
ایران

## شواهد شیمی-کانی شناسی و شیمی سنگ کل در تفریق سنگهای آذرین بنیان سد کرج

داریوش اسماعیلی، محمدولی ولیزاده، زینب نورالهی، علی کنعانیان

دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم دانشگاه تهران  
پست الکترونیکی: [esmaili@khayam.ut.ac.ir](mailto:esmaili@khayam.ut.ac.ir)

(دریافت مقاله ۱۳۸۴/۴/۵، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۴/۱۱/۱۸)

**چکیده:** سنگهای آذرین بنیان سد کرج بیشتر از گابرو، دیوریت و مونزودیوریت - مونزونیت تشکیل شده‌اند که به صورت موضعی به وسیله دایکهای تأخیری قطع شده‌اند. حاشیه‌های بالایی و پائینی این مجموعه دارای بافت پرفیری (حاشیه انجماد سریع) با ترکیب گابرویی بوده که از پائین به بالا به تدریج به گابرو همسان‌دانه، دیوریت و سیس مونزودیوریت- مونزونیت تغییر می‌یابد. نتایج تجزیه شیمیایی الکترون میکروپروب پلاژیوکلازها و پیروکسن‌های انواع مختلف سنگ‌های مورد مطالعه از حاشیه پائینی به سمت بالا نشان دهنده یک فرایند تفریقی است، به طوری که نمونه‌های حاشیه انجماد سریع که نشان دهنده ترکیب اصلی ماگمای اولیه است دارای  $Mg^{2+}$  (در پیروکسنها) و  $An\%$  (در پلاژیوکلازها) حدواسط نمونه‌های مونزونیتی و گابرویی هستند. به علاوه افزایش  $Mg^{2+}$  پیروکسن نمونه‌های حاشیه انجماد سریع حاشیه بالایی نسبت به حاشیه پائینی مؤید تفریقی است به صورت انتشار گرانشی. همچنین با پیشروی تفریق،  $K_2O$ ,  $Na_2O$  و عناصر ناسازگار افزایش،  $Al_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ، و عناصر سازگار کاهش یافته و نمونه‌های مورد مطالعه در نمودارهای  $LogLa-LogNi$  و  $LogZr-$   $LogNi$  در یک خط نسبتاً مستقیم و تقریباً افقی که نشانه فرایند تفریق است قرار می‌گیرند.

**واژه‌های کلیدی:** سد کرج - حاشیه انجماد سریع - شیمی کانی شناسی - تفریق ژئوشیمی.

## مقدمه

منطقه مورد مطالعه در شمال شهرستان کرج و در محدوده جغرافیایی  $50^{\circ} 50'$  تا  $51^{\circ} 15'$  طول شرقی و  $35^{\circ} 50'$  تا  $36^{\circ} 5'$  عرض شمالی قرار دارد که جاده آسفالتی کرج-چالوس نیز آنرا قطع می‌کند. منطقه سد کرج به دلیل موقعیت خاص زمین-شناسی و به ویژه وجود مقطع نمونه ائوسن در البرز (سازند کرج) همواره مورد توجه زمین‌شناسان ایرانی و خارجی بوده است. به عنوان مثال می‌توان به کارهای ریویز [۱]، بیلی و همکاران [۲]، گانسر [۳]، دلنباخ [۴]، زرعیان - فیاض [۵]، و ددوال [۶]، اشاره کرد. از نظر چینه‌شناسی مقالات ریویز را می‌توان مقالات اساسی و راهنمای مناسبی به حساب آورد. مقاله زرعیان - فیاض [۵] نیز توصیف صرفاً سنگ شناسانه‌ای است از توده سنگ‌های آذرین منطقه، و رساله دکتری ددوال [۶] توصیف کننده سازند کرج است. ولی‌زاده [۷] و نورالهی [۸] نیز به بررسی سنگ‌شناختی و ژئوشیمی سنگ‌های آذرین بنیان سد کرج پرداخته‌اند.

هدف از این پژوهش بررسی فرایند تفریق در سنگ‌های آذرین این منطقه با استفاده از داده‌های صحرایی، کانی‌شناسی، بافتی و نتایج تجزیه الکترون میکروپروب کانیهای پیروکسن و پلاژیوکلاز و شیمی سنگ کل است.

## زمین‌شناسی عمومی

سنگ‌های آذرین بنیان سد کرج بخشی از چارگوش نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ شمال غرب تهران و ۱:۱۰۰۰۰۰ شمال غربی کرج را به خود اختصاص داده‌اند. از نظر چینه‌شناسی این سنگها در حد فاصل عضوی توف میانی و توف بالایی سازند کرج که خود به صورت نا پیوسته‌ای روی ته‌نشستهای لیاس (سازند شمشک) و زیر کنگلومراهای سرخ نئوژن قرار دارد، تریق شده‌اند (شکل ۱). چشمگیرترین گسل موجود در منطقه گسلی است واقع در شمال محور ناودیس آدران و تقریباً به موازات آن که از ده خوزان کلاو و جنوب ده بریانچال می‌گذرد.

## سنگ‌شناسی توصیفی و کانی‌شناسی

با توجه به مشاهدات صحرایی و سنگ‌شناسی، سنگ‌های آذرین توده نفوذی بنیان سد کرج از حاشیه پائینی به سمت بالا، به بخشهای حاشیه انجماد سریع (گابروی پرفیری) پائینی، گابرو، دیوریت، مونزونیت و سپس حاشیه انجماد سریع (گابروی پرفیری) بالایی قابل تقسیم‌اند.

## گابروی پرفیری (حاشیه انجماد سریع)

این سنگها در کرانه‌های بالایی و پایینی توده نفوذی بنیان سد کرج قرار دارند و معمولاً نسبت به توده اصلی تیره‌تر بوده و در نمونه دستی بلورهای پلاژیوکلاز کلسیک

در یک متن ریزدانه خاکستری تیره مشاهده می‌شوند. زیر میکروسکوپ بافت اصلی این سنگها پرفیری دیده می‌شوند و بلورهای درشت خودشکل تا نیمه شکل‌دار پلاژیوکلاز و پیروکسن در یک زمینه ریزدانه متشکل از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز و ریز دانه‌های پیروکسن قرار گرفته‌اند (شکل ۲A). این سنگها به سمت داخل، درشت‌دانه و به تدریج دانه‌ها با بافت همسان‌دانه دیده می‌شوند.

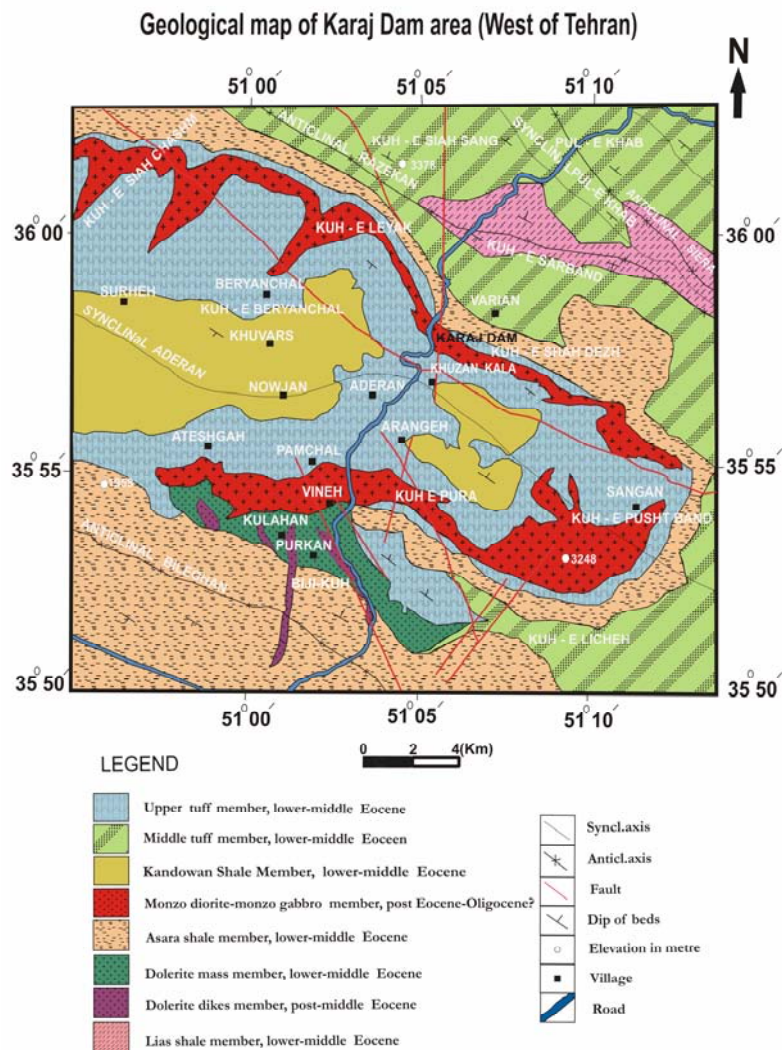
پلاژیوکلاز با ماکل تکراری و دوتایی تکراری (آلبیت-کارلسباد) در حدود ۴۵٪ متن سنگ را تشکیل داده است. اندازه این کانی‌ها در زمینه ریز بلور در حدود ۰/۵ میلی‌متر و درشت بلورهای آن به ۵ میلی‌متر می‌رسد. بر اساس نتایج آنالیز میکروپروب الکترونی (جدول ۱) ترکیب پلاژیوکلازها در حد لابرادوریت-آندزین (An<sub>۶۲/۸۱</sub>-۵۶/۰۱) است. پیروکسن به صورت خودشکل و نیمه شکل‌دار و در مواردی ماکل‌دار دیده می‌شود. این کانی از نوع اوژیت است و فراوانی آن به ۲۵٪ حجمی می‌رسد. بر اساس نتایج آنالیز میکروپروب الکترونی، ترکیب این کانی در حد (Wo<sub>۳۵.۴۷</sub> 42.۱۲ En<sub>۳۷.۳۹</sub> 43.۴۹ Fs<sub>۱۴.۸۵</sub> 27.۱۴) است (جدول ۲ و شکل ۴). به نظر می‌رسد که کرانه‌های گرد شده این کانی در اثر واکنش با آبگون اطراف در اوایل زمان تزریق توده و رشته‌های ظریف اورالیت و کلریت نیز حاصل دگرسانی آن باشند. همچنین دانه‌های خودشکل الیوین ایدنگسیتی شده به همراه دانه‌های کوچک کوارتز به صورت متضاد با هم در متن سنگ مشاهده می‌شوند که نشانه فرایند تبلور نامتعادل در حالت انجماد سریع است. آپاتیت، اسفن و کانی‌های کدر اجزای فرعی و کلریت، کلسیت، اکسید آهن، سربیسیت، اپیدوت و پرهنیت به عنوان کانی‌های دگرسان این سنگها محسوب می‌شوند.

### بخش گابرویی

این سنگ‌ها با رنگ تیره و بافت همسان‌دانه در بخش زیرین توده و بلافاصله بالای بخش گابروی پرفیری (انجماد سریع) قرار دارند و مرز آنها کاملاً تدریجی است. کانی‌های کدر اصلی به ترتیب فراوانی شامل پلاژیوکلاز و پیروکسن و کانی‌های فرعی شامل آپاتیت، اسفن، اپک و به ندرت آلکالی فلدسپار و بیوتیت هستند (شکل ۲B).

پلاژیوکلاز در حدود ۶۰ درصد از حجم سنگ را اشغال کرده و اندازه آن تا ۶ میلی‌متر می‌رسد که نشانگر زمان مناسب برای تبلور آن است. این کانی گاهی دارای منطقه‌بندی عادی است که می‌تواند گویای تزریق ماگما به اعماق کم و سرعت بالای تبلور باشد. بر اساس نتایج آنالیز میکروپروب الکترونی (جدول ۲) ترکیب پلاژیوکلازها در حد بیتونیت و لابرادوریت (An<sub>۶۷/۳۳</sub>-۸۲/۳۱) است. حضور پلاژیوکلاز به صورت ورودی پیروکسن، نشانگر تقدم تبلور این کانی نسبت به پیروکسن و درصد بالای کلسیم آن است. این کانی خصوصاً در بخش مرکزی به اپیدوت، کلسیت،

اپیدوت و کلریت تجزیه شده و علاوه بر سوسوریتی شدن گاهی تحت تاثیر پرهنیت‌زایی نیز واقع شده است. پیروکسن به صورت بلورهای نیمه شکل‌دار با خاموشی مایل ( $45^\circ$ ) دیده می‌شود و بر اساس نتایج آنالیز میکروپروب الکترونی (جدول ۱ و شکل ۴) ترکیب آن در حد ( $Wo_{42.41} 44.49 En_{41.82} 43.32 Fs_{12.25} 14.45$ ) است. حداکثر قطر بلورهای این کانی به ۳ میلی‌متر می‌رسد و گاهی به وسیله اورالیت، بیوتیت، کلریت، کلسیت و اکسید آهن جانشین شده است. همانند سنگ‌های بخش حاشیه انجماد سریع، کانی‌های کدر، آپاتیت و اسفن اجزای فرعی این سنگها را تشکیل می‌دهند.



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه سد کرج، غرب تهران (نورالهی، ۱۳۸۳)

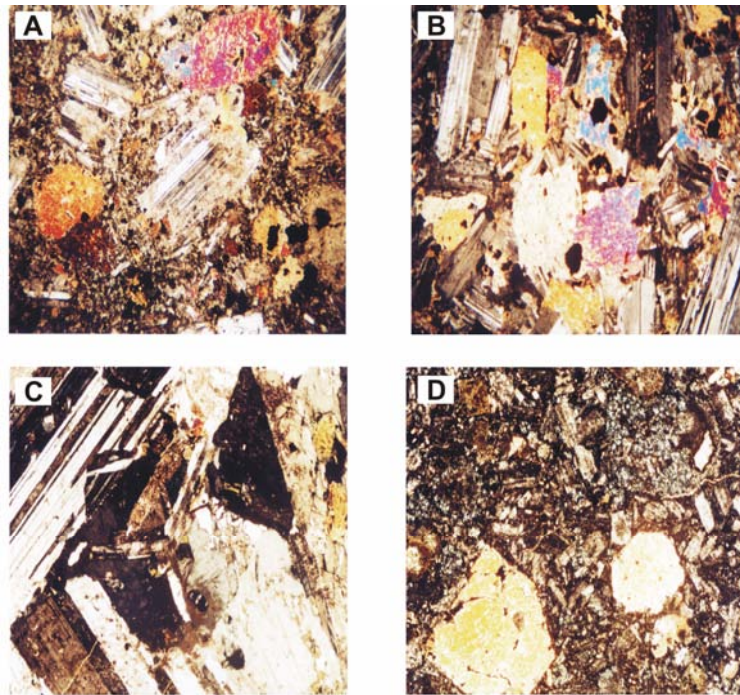
جدول ۱ نتایج آنالیز میکروپروپو الکترونی پیروکسن واحدهای مختلف توده نفوذی منطقه سدکرج. عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر کمیاب بر حسب ppm اند.

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	total	Wo%	En%	Fs%	Mg#
بخش حاشیه انجماد سرخ	۵۲٫۱۳	۰٫۵۰	۰٫۸۹	۱۲٫۸۷	۰٫۴۵	۱۱٫۳۳	۲۰٫۹۴	۰٫۶۴	۰٫۰۸	۰٫۰۰	۹۹٫۸۳	۴۵٫۳۶	۳۴٫۱۷	۲۰٫۴۷	۶۲٫۵۴
	۵۰٫۳۷	۰٫۸۰	۳٫۰۴	۱۰٫۶۵	۰٫۰۰	۱۴٫۴۹	۱۹٫۰۰	۰٫۲۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۹۹٫۰۹	۴۱٫۷۶	۴۳٫۱۹	۱۵٫۰۵	۷۴٫۱۵
	۵۴٫۱۰	۰٫۶۷	۳٫۱۱	۹٫۵۸	۰٫۰۰	۱۳٫۴۸	۱۷٫۸۰	۰٫۲۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۹۸٫۹۶	۳۵٫۴۷	۳۷٫۳۹	۲۷٫۱۴	۵۷٫۹۴
	۵۰٫۶۷	۰٫۷۶	۳٫۰۴	۱۰٫۶۲	۰٫۰۰	۱۴٫۳۱	۱۹٫۶۹	۰٫۳۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۹۹٫۳۹	۴۲٫۱۲	۴۲٫۶۰	۱۵٫۲۸	۷۳٫۶۰
	۵۰٫۸۹	۰٫۸۷	۳٫۰۵	۱۰٫۷۲	۰٫۰۰	۱۴٫۳۱	۱۹٫۶۵	۰٫۳۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۹۹٫۸۱	۴۱٫۸۸	۴۲٫۴۳	۱۵٫۶۹	۷۳٫۰۱
	۵۱٫۲۱	۰٫۸۳	۲٫۹۱	۱۰٫۸۱	۰٫۰۰	۱۴٫۳۲	۱۹٫۵۷	۰٫۲۷	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۹۹٫۹۳	۴۱٫۲۸	۴۲٫۰۳	۱۶٫۶۹	۷۱٫۵۷
	۵۱٫۰۵	۰٫۸۱	۳٫۱۴	۱٫۱۵	۰٫۰۰	۱۴٫۴۷	۱۸٫۹۴	۰٫۲۵	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۹۹٫۸۰	۴۰٫۰۳	۴۲٫۵۶	۱۷٫۴۱	۷۰٫۹۷
	۵۰٫۵۷	۰٫۸۴	۳٫۰۶	۱۱٫۰۳	۰٫۰۰	۱۴٫۶۰	۱۹٫۵۴	۰٫۲۷	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۹۹٫۹۲	۴۱٫۷۵	۴۳٫۴۰	۱۴٫۸۵	۷۴٫۵۰
	۵۰٫۵۴	۰٫۸۵	۳٫۲۸	۱۱٫۲۵	۰٫۰۰	۱۴٫۵۴	۱۸٫۶۶	۰٫۳۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۹۹٫۴۷	۴۰٫۱۰	۴۳٫۴۹	۱۶٫۴۱	۷۲٫۶۰
	۵۲٫۱۳	۰٫۵۰	۰٫۸۹	۱۲٫۱۱	۰٫۴۵	۱۱٫۳۳	۲۰٫۹۴	۰٫۶۴	۰٫۰۸	۰٫۰۰	۹۹٫۰۷	۴۵٫۳۸	۳۴٫۱۷	۲۰٫۴۶	۶۲٫۵۵
بخش گلبرونی	۵۱٫۳۵	۰٫۸۱	۲٫۶۰	۹٫۵۱	۰٫۲۶	۱۴٫۵	۲۰٫۶۸	۰٫۲۸	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۱۰۰٫۳۵	۴۳٫۷۶	۴۳٫۷۲	۱۲٫۵۲	۷۷٫۷۴
	۵۱٫۷۶	۰٫۸۸	۲٫۴۸	۹٫۵۰	۰٫۲۸	۱۴٫۵۸	۲۱٫۲۲	۰٫۲۶	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۱۰۰٫۹۹	۴۴٫۴۲	۴۲٫۴۶	۱۳٫۱۲	۷۶٫۳۹
	۵۱٫۹۰	۰٫۶۵	۱٫۸۸	۹٫۶۴	۰٫۰۰	۱۴٫۵۵	۲۱٫۴۰	۰٫۱۳	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۱۰۰٫۱۶	۴۴٫۲۱	۴۱٫۸۲	۱۳٫۹۸	۷۴٫۹۵
	۵۱٫۰۹	۰٫۷۶	۲٫۵۹	۹٫۹۰	۰٫۳۴	۱۴٫۲۹	۲۰٫۸۷	۰٫۲۷	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۱۰۰٫۱۸	۴۴٫۴۹	۴۲٫۳۸	۱۳٫۱۳	۷۶٫۳۵
	۵۱٫۵۱	۰٫۹۱	۲٫۹۸	۸٫۴۵	۰٫۳۴	۱۴٫۷۶	۲۰٫۵۵	۰٫۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۹۹٫۷۵	۴۳٫۱۰	۴۳٫۰۸	۱۳٫۸۲	۷۵٫۷۱
	۵۱٫۳۵	۰٫۸۱	۲٫۶	۷٫۵۸	۰٫۲۶	۱۴٫۸۵	۲۰٫۶۸	۰٫۲۸	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۹۸٫۴۲	۴۳٫۷۴	۴۳٫۷۱	۱۲٫۵۶	۷۷٫۶۸
	۵۱٫۷۶	۰٫۸۸	۲٫۴۸	۸٫۰۴	۰٫۲۸	۱۴٫۵۸	۲۱٫۲۲	۰٫۲۶	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۹۹٫۵۴	۴۴٫۴۲	۴۲٫۴۷	۱۳٫۱۱	۷۶٫۴۲
	۵۱٫۲۱	۰٫۸۴	۲٫۸۵	۸٫۷۴	۰٫۴۲	۱۴٫۶۴	۲۰٫۰۳	۰٫۲۳	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۹۸٫۹۷	۴۲٫۴۱	۴۳٫۱۴	۱۴٫۴۵	۷۴٫۹۱
	۵۱٫۴	۰٫۷	۲٫۷۸	۸٫۲۹	۰٫۳۴	۱۴٫۶۶	۲۰٫۳	۰٫۲۸	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۹۸٫۷۵	۴۳٫۰۲	۴۳٫۲۳	۱۳٫۷۵	۷۵٫۸۷
	۵۱٫۰۹	۰٫۷۶	۲٫۵۹	۷٫۹	۰٫۳۴	۱۴٫۲۹	۲۰٫۸۷	۰٫۲۷	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۹۸٫۱۷	۴۴٫۴۷	۴۲٫۳۷	۱۳٫۱۵	۷۶٫۳۱
بخش موزونیتی	۴۸٫۴۲	۰٫۴۳	۳٫۳۲	۲۳٫۴۴	۰٫۵۸	۸٫۵۵	۱۰٫۳۹	۰٫۹۹	۰٫۳۶	۰٫۰۰	۹۶٫۴۸	۲۵٫۵۹	۲۹٫۳۱	۴۵٫۱۰	۳۹٫۳۸
	۴۹٫۵۸	۰٫۳	۲٫۰۳	۲۳٫۷۱	۰٫۵۴	۹٫۸	۹٫۶۷	۰٫۸۱	۰٫۱۸	۰٫۰۰	۹۶٫۸۹	۲۲٫۵۱	۳۱٫۷۵	۴۵٫۷۴	۴۰٫۹۷
	۵۱٫۵	۰٫۱۷	۱٫۷	۲۳٫۰۳	۰٫۳۲	۸٫۶۵	۱۱٫۶۷	۰٫۴۶	۰٫۲۸	۰٫۰۰	۹۷٫۹۳	۲۵٫۵۱	۲۶٫۳۱	۴۸٫۱۸	۳۵٫۳۲
	۴۹٫۷۲	۰٫۲۲	۱٫۸۶	۲۲٫۱۱	۰٫۴۹	۸٫۸۱	۹٫۶۷	۰٫۷۱	۰٫۱۷	۰٫۰۳	۹۳٫۷۹	۲۲٫۳۸	۲۸٫۳۸	۴۹٫۲۴	۳۶٫۵۶
	۴۸٫۴۲	۰٫۴۳	۳٫۳۲	۲۴٫۲۲	۰٫۵۸	۸٫۵۵	۱۰٫۳۹	۰٫۹۹	۰٫۳۶	۰٫۰۰	۹۷٫۲۷	۲۵٫۶۱	۲۹٫۳۲	۴۵٫۰۸	۳۹٫۴۱
	۴۹٫۸۴	۰٫۳۰	۲٫۰۳	۲۳٫۷۱	۰٫۵۴	۹٫۸۰	۹٫۶۷	۰٫۸۱	۰٫۱۸	۰٫۰۰	۹۶٫۹۰	۲۲٫۵۳	۳۱٫۷۷	۴۵٫۷۰	۴۱٫۰۱
	۵۱٫۶۵	۰٫۱۷	۱٫۷۰	۲۳٫۰۳	۰٫۳۲	۸٫۶۵	۱۱٫۶۷	۰٫۴۶	۰٫۲۸	۰٫۰۰	۹۷٫۹۳	۲۵٫۵۱	۲۶٫۳۱	۴۸٫۱۹	۳۵٫۳۱
	۴۹٫۷۱	۰٫۲۲	۱٫۸۶	۲۲٫۱۱	۰٫۴۹	۸٫۸۱	۹٫۶۷	۰٫۷۱	۰٫۱۷	۰٫۰۳	۹۳٫۷۸	۲۲٫۳۸	۲۸٫۳۷	۴۹٫۲۵	۳۶٫۵۵
	۴۲٫۹۹	۰٫۱۱	۳٫۳۵	۲۳٫۷۴	۰٫۴۱	۷٫۵۰	۹٫۶۵	۰٫۴	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۹۷٫۸۴	۱۹٫۷۰	۲۱٫۳۱	۵۹٫۰۰	۲۶٫۵۳
	۵۰٫۸۰	۰٫۹۸	۲٫۴۹	۲۳٫۳۸	۰٫۴۸	۸٫۹۴	۱۰٫۷۷	۰٫۲۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۹۸٫۰۶	۲۲٫۹۶	۲۶٫۴۹	۵۰٫۵۵	۳۴٫۳۹

جدول ۲ آنالیز میکروپروب الکترونی فلدسپار واحدهای مختلف توده نفوذی منطقه سد کرج. عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر کمیاب بر حسب ppm اند.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total	Or	Ab	An
بخش حاشیه‌ای جماد سربغ	۵۴,۳۴	۲۷,۸۹	۱۱,۹۰	۳,۹۵	۰,۹۶	۹۹,۶۵	۵,۶۷	۳۵,۴۰	۵۸,۹۳
	۵۲,۶۵	۲۸,۸۶	۱۲,۹۵	۳,۷۷	۰,۷۷	۹۹,۶۹	۴,۴۳	۳۲,۹۹	۶۲,۵۹
	۵۳,۵۹	۲۷,۹۱	۹,۳۲	۴,۰۷	۲,۳۲	۹۸,۲۰	۱۴,۱۹	۳۷,۸۹	۴۷,۹۳
	۵۱,۵۸	۲۸,۳۴	۱۲,۹۹	۳,۷۴	۰,۸۲	۹۸,۲۱	۴,۷۱	۳۲,۶۲	۶۲,۶۷
	۵۱,۶۰	۲۷,۸۳	۱۲,۵۵	۴,۰۵	۰,۸۹	۹۷,۸۳	۵,۰۴	۳۵,۰۲	۵۹,۹۴
	۵۱,۳۴	۲۸,۰۶	۱۲,۸۹	۳,۹۲	۰,۷۳	۹۷,۷۷	۴,۱۵	۳۴,۰۵	۶۱,۸۱
	۵۲,۵۰	۲۷,۶۷	۱۲,۰۳	۴,۰۳	۰,۹۵	۹۷,۹۰	۵,۵۴	۳۵,۶۴	۵۸,۸۲
	۵۱,۷۸	۲۷,۷۰	۱۲,۶۰	۳,۸۰	۰,۸۱	۹۷,۴۷	۴,۷۱	۳۳,۶۵	۶۱,۶۳
	۵۱,۳۹	۲۷,۸۱	۱۲,۷۱	۳,۷۷	۰,۸۴	۹۷,۳۳	۴,۸۴	۳۳,۲۵	۶۱,۹۰
۶۰,۱۶	۲۳,۱۷	۱۰,۴۴	۳,۰۲	۰,۶۱	۹۸,۲۰	۴,۳۵	۳۲,۸۴	۶۲,۸۱	
بخش گابرونی	۵۰,۸۱	۲۴,۷۴	۱۴,۱۲	۰,۰۰	۰,۰۰	۹۱,۴۳	۰,۰۰۱	۰,۰۰۳	۹۹,۹۹۷
	۵۲,۷۶	۲۹,۱۷	۱۳,۰۳	۳,۹۴	۰,۴۹	۱۰۰,۰۸	۲,۷۸۸	۳۴,۴۱۳	۶۲,۸۰۰
	۵۳,۰۲	۲۸,۸۱	۱۲,۸۹	۳,۹۸	۰,۵۰	۹۹,۹۵	۲,۸۹۹	۳۴,۸۱۰	۶۴,۲۹۱
	۵۲,۹۹	۲۸,۶۸	۱۳,۰۱	۴,۰۶	۰,۴۳	۹۹,۹۵	۲,۴۷۰	۳۵,۱۷۱	۶۲,۳۵۹
	۵۲,۹۴	۲۸,۶۷	۱۲,۷۳	۳,۹۳	۰,۴۳	۹۹,۴۲	۲,۵۰۵	۳۴,۹۳۱	۶۲,۵۶۴
	۵۳,۷۶	۲۸,۲۸	۱۲,۰۸	۴,۶۴	۰,۳۴	۹۹,۶۰	۱,۹۶۴	۴۰,۲۰۹	۵۷,۸۲۷
	۵۱,۰۵	۳۰,۴۲	۱۴,۳۵	۳,۵۸	۰,۱۳	۱۰۰,۱۵	۰,۷۵۷	۳۰,۸۵۴	۶۸,۳۸۹
	۴۴,۴۱	۲۸,۴۵	۱۶,۱۶	۲,۰۴	۱,۹۱	۹۴,۶۳	۱۰,۲۹۰	۱۶,۶۶۷	۷۳,۰۴۳
	۵۳,۴۹	۲۸,۵	۱۲,۳	۴,۱۱	۰,۵۶	۹۹,۶۷	۳,۲۶۸	۳۶,۴۵۱	۶۰,۲۸۱
	۵۲,۷۷	۲۹,۱۷	۱۳,۰۳	۳,۹۴	۰,۴۹	۱۰۰,۱۳	۲,۸۱۲	۳۴,۳۷۲	۶۲,۸۱۵
	۵۳,۰۳	۲۸,۸۱	۱۲,۸۹	۳,۹۸	۰,۵	۹۹,۹۹	۲,۸۷۸	۳۴,۸۱۵	۶۲,۳۰۸
	۵۲,۹۹	۲۸,۶۹	۱۳,۰۱	۴,۰۶	۰,۴۳	۹۹,۹۹	۲,۴۵۳	۳۵,۲۰۶	۶۲,۳۴۱
	۵۲,۹۴	۲۸,۶۷	۱۲,۷۳	۳,۹۳	۰,۴۳	۹۹,۴۹	۲,۵۱۵	۳۴,۹۴۱	۶۲,۵۴۴
۵۳,۷۶	۲۸,۲۸	۱۲,۰۸	۴,۶۴	۰,۳۴	۹۹,۶۰	۱,۹۳۹	۴۰,۲۱۱	۵۷,۸۵۰	
۵۱,۰۵	۲۷,۷۲	۱۴,۳۵	۳,۵۸	۰,۱۳	۹۷,۴۹	۰,۷۳۸	۳۰,۸۷۴	۶۸,۳۸۸	
بخش موزونیتی	۶۳,۴۵	۱۷,۵۲	۰,۰۷	۰,۴۷	۱۵,۰۳	۹۶,۷۰	۹۵,۱۱	۴,۵۲	۰,۲۷
	۶۲,۰۱	۱۷,۰۰	۰,۰۱	۰,۹۵	۱۶,۰۲	۹۶,۰۱	۹۱,۷۰	۸,۲۶	۰,۰۴
	۶۳,۵۵	۱۷,۵۴	۰,۰۸	۱,۰۰	۱۵,۵۰	۹۷,۹۶	۹۰,۶۷	۸,۹۲	۰,۴۱
	۶۳,۴۴	۱۷,۵۲	۰,۰۷	۰,۴۷	۱۵,۰۳	۹۶,۶۸	۹۵,۱۳	۴,۵۲	۰,۲۵
	۶۲,۱۳	۱۶,۵۰	۰,۰۰	۰,۵۴	۱۷,۰۱	۹۶,۱۸	۹۵,۳۸	۴,۶۰	۰,۰۱
	۶۴,۰۰	۱۵,۹۵	۰,۰۵	۰,۹۲	۱۶,۹۸	۹۷,۹۰	۹۲,۱۷	۷,۵۹	۰,۲۴
	۶۳,۹۵	۱۷,۲۲	۰,۰۱	۲,۴۰	۱۶,۵۶	۱۰۰,۱۵	۸۱,۹۰	۱۸,۰۴	۰,۰۶
	۶۳,۹۷	۱۶,۰۱	۰,۰۵	۰,۷۰	۱۷,۰۰	۹۶,۷۳	۹۳,۸۹	۵,۸۸	۰,۲۳
	۶۴,۵	۲۳,۰۱	۰,۷۶	۹,۱۰	۲,۱۷	۹۹,۷۴	۱۳,۰۴	۸۳,۱۰	۳,۸۶
	۶۸,۲	۱۹,۱۱	۰,۱۰	۱۱,۳۳	۰,۱۷	۹۹,۵۳	۱,۰۰	۹۸,۵۵	۰,۴۶
	۶۵,۶۵	۱۸,۴۷	۰,۴۵	۱۰,۹۷	۰,۵۷	۹۶,۱۳	۳,۲۵	۹۴,۶۱	۲,۱۴
	۶۷,۰۸	۱۸,۵۸	۰,۲۵	۱۱,۴۷	۰,۰۷	۹۷,۴۷	۰,۳۸	۹۸,۴۵	۱,۱۷
	۶۸,۱۱	۱۹,۱۵	۰,۳۹	۱۱,۱۵	۰,۳۹	۹۹,۳۹	۲,۲۳	۹۵,۹۳	۱,۸۴
	۶۸,۸۸	۱۹,۳۲	۰,۴۰	۱۱,۷۴	۰,۰۸	۱۰۰,۴۶	۰,۴۳	۹۷,۷۱	۱,۸۶
	۶۸,۷۰	۱۹,۱۰	۰,۵۴	۱۰,۱۵	۲,۳۱	۱۰۰,۸۳	۱۲,۷۰	۸۴,۸۱	۲,۴۹





شکل ۲ مقاطع نازک نمونه‌های نماینده واحدهای مختلف سنگ‌های آذرین سدکرج: (A) گابروی پرفیری حاشیه انجماد سریع، (B) گابروی دانه درشت، (C) مونزونیت، (D) دولریت.

#### بخش دیوریتی

دیوریتها پس از بخش گابرویی به تدریج از کرانه زیرین توده به سمت بخشهای بالاتر توده، ظاهر می‌شوند. پلاژیوکلاز، پیروکسن و تا حدودی آمفیبول اجزای اصلی و آپاتیت، اسفن، اپک، بیوتیت، و آلکالی‌فلدسپار کانی‌های فرعی این سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند. به علاوه کوارتز نیز به میزان اندک به صورت بافت میرمیکیتی و گرافیکی، پلاژیوکلازها را همراهی می‌کند. این سنگ‌ها در مقاطع میکروسکوپی دارای بافت درشت دانه (گرانولار) بوده و اغلب بلورها بیش از ۵ میلی‌متر قطر دارند.

#### بخش مونزونیتی

بخش مونزونیتی پس از بخش دیوریتی و در بخش بالایی این توده سنگ آذرین قرار دارد و در اصل محصول پایانی تفریق است. بافت آنها گرانولار و بلورهای پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپار صورتی رنگ (ارتوز) اجزای اصلی آنها را تشکیل می‌دهند (شکل ۲C). پلاژیوکلاز با زاویه خاموشی  $20^{\circ}$ – $10^{\circ}$  در حد الیگوکلاز - آلبیت ( $An_{5-30}$ ) تشخیص داده شده است که نتایج آنالیز میکروپروب الکترونی (جدول ۲) نیز آنرا تأیید می‌کند ( $An_{0.01-24.59}$ ). ارتوز دومین تشکیل دهنده اصلی مونزونیت‌هاست که به صورت نیمه شکل‌دار تا بی شکل بوده و اغلب به کائولینیت

دگرسان و سطح آن کم و بیش به حالت کدر است. به اعتقاد دیر و همکاران [۹] حالت کدر و قهوه‌ای رنگ فلدسپارها تنها در اثر تشکیل کانی‌های کائولینیت نیست، بلکه گاهی وجود واکوئول‌های سرشار از آبگونی که در اثر فعالیت‌های گرمابی یا حتی در اثر هوازدگی تشکیل می‌شوند حالت قهوه‌ای مات به کانی می‌دهد. کانی‌های فرومنیزین این سنگ نسبت به انواع تفریق نیافته‌تر بسیار کمتر بوده و کانی‌های هورنبلند و بیوتیت فراوان‌تر از پیروکسن‌اند. بر اساس نتایج آنالیز میکروپروب الکترونی (جدول ۱ و شکل ۴) ترکیب پیروکسن در بخش مونزونیتی در حد  $(\text{Wo}_{19.70} \text{En}_{21.31} \text{Fs}_{45.10} \text{An}_{13.77})$  است. بیوتیت به صورت اولیه و ثانویه در این سنگها وجود دارد و روی هم رفته میانگین آن ۶٪ حجمی سنگ را به خود اختصاص می‌دهد. کانی‌های کدر، کوارتز، آپاتیت و زیرکن از کانی‌های فرعی این سنگ محسوب می‌شوند.

### دایک‌های تأخیری

دایک‌های تأخیری چندی با ترکیب مونزونیت تا مونزونیت کوارتزار توده نفوذی بنیان سد کرج را در برخی از مناطق قطع کرده‌اند. این سنگ‌ها در نمونه‌دستی با رنگ روشن و بافت تأخیری حاوی فنوکریست‌هایی از آلکالی‌فلدسپار در زمینه‌ای ریزدانه قابل مشاهده هستند. این دایک‌ها در واقع محصول انجماد شماره باقی مانده در پایان انجماد توده است که درز و ترک‌های حاصل از انقباض ناشی از انجماد و سرد شدن توده را پر کرده است. به طور کلی دایک‌های تأخیری در منطقه نادرند و سایر فازهای نهایی ماگمایی مثل پگماتیت‌ها نیز در این مجموعه مشاهده نشده‌اند.

### مجموعه سنگ‌های دلریتی

سنگ‌های دلریتی در منطقه به دو صورت استوک و دایک دیده می‌شوند. استوک دلریتی نسبت به توده نفوذی بنیان سد کرج بسیار کوچکتر است و در بخش زیرین شاخه جنوبی آن قرار دارد. توده آذرین نفوذی اصلی در محل، در کنار استوک دلریتی مذکور به وضوح دارای حاشیه انجماد سریع است. از طرفی وجود آنکلاوهایی از جنس دلریت - که اثرهای آن به صورت کروی یا بیضوی با قطر تا ۵۰ سانتی‌متر در توده نفوذی اصلی قابل مشاهده‌اند - نشانگر قدمت بیشتر آنها نسبت به توده نفوذی بنیان سد کرج است. سرشت این استوک دلریتی به گونه‌ای است که در مقایسه با سنگ‌های توده اصلی بیشتر تحت تأثیر هوازدگی و فرسایش قرار گرفته است و در نتیجه از لحاظ ریخت‌شناسی، توپوگرافی نسبتاً کم ارتفاع‌تری را تشکیل می‌دهند. دایک‌های دلریتی که حداکثر ضخامت آنها در منطقه به ۲ متر می‌رسد، بیشتر توده دلریتی و سنگ‌های آتشفشانی پیرو کلاستیک سازند کرج را قطع کرده ولی اثری از آنها در سنگ‌های آذرین بنیان سد کرج دیده نمی‌شود. این سنگ‌ها زیر میکروسکوپ دارای بافت اینترسرتال یا هیالومیکرولیتی پرفیری بوده و کانی‌های اصلی آن را اوزریت

و پلاژیوکلاز تشکیل می‌دهند (شکل ۲D). خمیره شیشه‌ای این سنگ‌ها بیشتر کلریتی شده است. کانی‌های کدر، آپاتیت و اسفن اجزای فرعی و سربیسیت، آلبیت نفوفورمه، اکسید آهن، پرهنیت، کلریت و اپیدوت کانی‌های ثانویه این سنگها را تشکیل می‌دهند.

### روش آزمایشگاهی

برای بررسی‌های سنگ شناختی و ژئوشیمی، چهارده نمونه از عناصر اصلی و کمیاب بخش‌های مختلف مورد توده نفوذی بنیان سد کرج و سنگ‌های دلریتی انتخاب و در آزمایشگاه ژئوشیمی SGS کانادا به روش ICP (Inductively Coupled Plasma) و MS-ICP مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. تعداد ۲۵۰ نقطه از انواع کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌های مختلف مطالعه به وسیله دستگاه میکروپروب الکترونی Came box SX50 در آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشگاه پول ساباتییه شهر تولوز فرانسه آنالیز شدند. شتاب ولتاژ دستگاه 15KV و طیف جریان 15NA و زمان شمارش بسته به نوع عنصر بین ۶ و ۲۵ ثانیه بوده است.

تلفیق اطلاعات و رسم نقشه‌ها با استفاده از نرم افزار PHOTO SHOPE 7.Me, COREL 11.0 و پردازش آماری و بررسی‌های سنگ شناختی و ژئوشیمیایی، با نرم‌افزارهای NEW PET, IG PET, WORD, EXELL 7.0 صورت گرفته است.

### شیمی کانی‌ها

به منظور بررسی دقیق رفتار ژئوشیمی عناصر مختلف در ساختار کانی‌ها و تکمیل مطالعات صحرایی، سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی سنگ‌های نفوذی بنیان سد کرج، ۲۴ مقطع نازک- صیقلی تهیه و سپس تعداد ۲۵۰ نقطه از کانی‌های پیروکسن و فلدسپار سنگهای حاشیه انجماد سریع، گابرو و مونزونیت مورد بررسی میکروپروب الکترونی قرار گرفتند که در جدول ۱ و ۲ آورده شده‌اند.

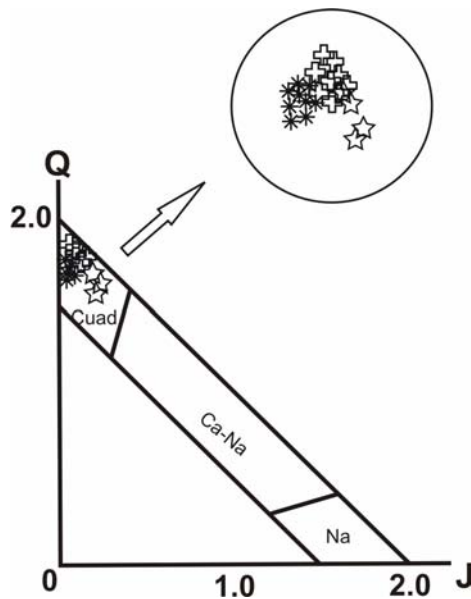
### شیمی پیروکسن‌ها

پیروکسن‌ها تقریباً در کلیه نمونه سنگ‌های آذرین مورد مطالعه دیده شده‌اند. این کانی‌ها بیشتر از نوع اوژیت بوده که البته در سنگ‌های مختلف، تغییرات قابل توجهی از نظر ترکیب شیمیایی از خود نشان می‌دهند. نتایج کمی آنالیز این کانی‌ها به صورت اکسیدهای تشکیل دهنده این کانی همراه با فرمول ساختاری آنها که برمبنای ۱۶ اکسیژن محاسبه شده است در جدول (۱) آورده شده است. کلیه پیروکسن‌های مورد مطالعه روی نمودار  $Q=Ca+Mg+Fe^{2+}$  نسبت به  $J=2Na$  [10] در قلمرو پیروکسن‌های کلسیم، منیزیم، و آهن دار قرار می‌گیرند (شکل ۳) و به دلیل کمبود سدیم، همه آنها نزدیک به محور Y، بین نقاط  $R=1/80$  و  $R=2$  متمرکز

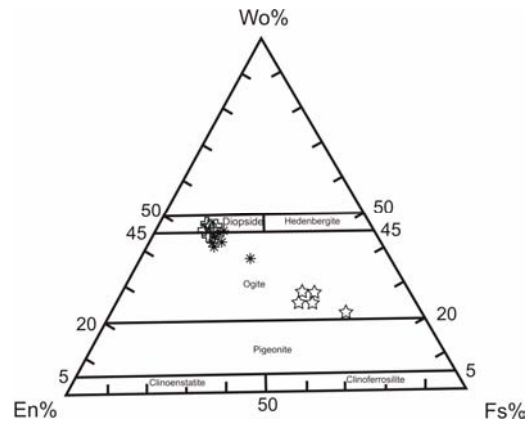
می‌شوند. مطابق شکل ۴ ترکیب کلینو پیروکسن‌ها در سنگهای حاشیة انجماد سریع در حد  $Wo_{42.41-44.49} En_{41.82-43.32} Fs_{22.5-14.45}$ ، در گابروها در حد  $Wo_{35.47-42.12} En_{37.39-43.49} Fs_{14.85-27.14}$  و در مونزونیت‌ها در حد  $Wo_{19.70-25.61} En_{21.31-31.77} Fs_{45.10-59.00}$  متغیر است. جدول (۱) حدود تغییرات ترکیب شیمیایی و شکل (۴) موقعیت کلینوپيروكسن‌های بخش‌های متفاوت توده نفوذی بنیان سد کرج را در نمودار سه تایی ولاستونیت، انستاتیت، فروسیلیت [۱۰] نشان می‌دهد. ترکیب پیروکسن درمونزونیت‌ها بیشتر به قطب FS و مرز پیژونیت نزدیک می‌شوند.

### شیمی فلدسپارها

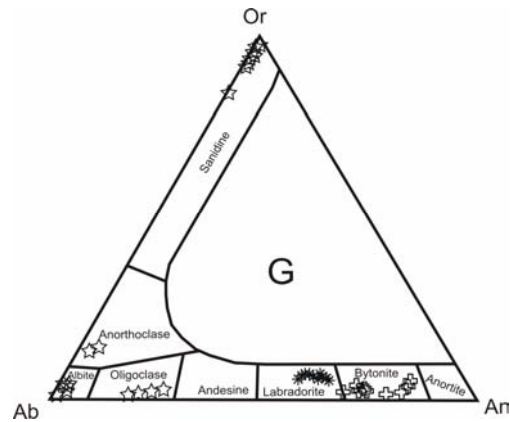
فلدسپار به عنوان اصلی‌ترین کانی سنگ‌های آذرین بنیان سد کرج ظاهر می‌شود. جدول (۲) مقادیر ترکیب شیمیایی و (شکل ۵) موقعیت فلدسپار واحدهای مختلف مورد مطالعه را در نمودار [۱۴] Ab An Or نشان می‌دهد. در فلدسپارهای بخش حاشیة انجماد سریع، میزان آنورتیت از ۵۶٫۰۱ تا ۶۲٫۸۱ درصد (لابرادوریت) و در بخش گابرویی از ۶۷٫۳۳ تا ۷۷٫۸۸ درصد (بیتونیت تا لابرادوریت) تغییر می‌کند. طیف ترکیبی پلاژیوکلازهای موجود در بخش مونزونیتی از الیگوکلاز تا آلبیت متغیر بوده و دارای ۰٫۰۱ تا ۲۴٫۵۹ درصد آنورتیت است.



شکل ۳ ترکیب پیروکسن سنگ‌های آذرین توده نفوذی منطقه سد کرج در نمودار Q-J [10] که محورهای آن بر حسب تعداد کاتیون در فرمول ساختاری نوشته شده است، تمامی نمونه‌ها در قلمرو پیروکسن‌های کلسیم-منیزیم و آهن‌دار قرار می‌گیرند. علائم: \* حاشیه انجماد سریع بالایی، ☆ مونزونیت و † گابرو.



شکل ۴ موقعیت پیروکسن واحدهای مختلف توده نفوذی منطقه سد کرج در نمودار مثلثی و لاستونیت (Wo) - انستاتیت (En) - فروسیلیت (Fs) [10]. علائم مانند شکل ۳ انتخاب شده‌اند.



شکل ۵ موقعیت فلدسپار واحدهای مختلف توده نفوذی منطقه سد کرج در نمودار سه تایی ارتوز (Or) - آلیت (Ab) - آنورتیت (An) [۹]. علائم مانند شکل ۳ انتخاب شده‌اند.

### شیمی سنگ کل

#### عناصر اصلی

عناصر اصلی و کمیاب تعداد چهارده نمونه از انواع مختلف سنگهای آذرین منطقه سد کرج مورد آنالیز قرار گرفتند (جدول ۳). مقدار  $\text{SiO}_2$  در نمونه‌های مورد مطالعه از ۴۹٫۱ درصد در سنگ‌های دولریتی تا ۵۶٫۱ درصد در مونزونیت‌ها متغیر است. تغییرات عناصر اصلی و کمیاب در مقابل  $\text{SiO}_2$  در شکل ۶ دیده می‌شوند. چنانکه ملاحظه می‌شود یک انطباق منفی بین  $\text{CaO}$ ،  $\text{FeO}$ ،  $\text{MgO}$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و یک انطباق مثبت بین  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{K}_2\text{O}$  با  $\text{SiO}_2$  در این مجموعه وجود دارد. شیب تغییرات  $\text{CaO}$ ،  $\text{FeO}$ ،  $\text{MgO}$  و  $\text{CaO}$  در سنگ‌های حاشیه انجماد سریع و گابرو نسبتاً تند است و دلیل آن مصرف این عناصر در ترم‌های بازیگ در ساختار کانی‌هایی نظیر الیوین، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلازهای کلسیک است. روند تغییرات این عناصر سنگ‌های محصول پایانی تفریق (مونزودیوریت - مونزونیت) به دلیل کم بودن مقدار این عناصر در ماگمای باقیمانده سازنده آنها نسبتاً آرام است. پراکندگی  $\text{CaO}$  در سه نمونه کمی متفاوت از روند عمومی مورد انتظار است که علت آن احتمالاً در ارتباط با موارد زیر است: یک نمونه مربوط به واحد گابرویی است که تا حدودی در اثر دگرسانی کلسیتی شده است و به همین دلیل مقدار  $\text{CaO}$  بیشتری را نشان می‌دهد؛ دو نمونه دیگر مربوط به سنگ‌های حاشیه انجماد سریع‌اند که نمونه حاشیه انجماد سریع بالایی مقدار نسبتاً زیادتر و نمونه حاشیه انجماد سریع پائینی مقدار نسبتاً پائین‌تری  $\text{CaO}$  نشان می‌دهند (برعکس آهن) که علت آن می‌تواند در ارتباط با تفریق گرانشی عنصر کلسیم باشد.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  با افزایش  $\text{SiO}_2$  نخست افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این امر احتمالاً در ارتباط با تقدم تبلور و تفریق کانی‌های مافیک مثل الیوین و کلینوپیروکسن است که در ادامه به وسیله تبلور و تفریق پلاژیوکلاز دنبال شده است. مقدار  $\text{MnO}$  با افزایش مقدار  $\text{SiO}_2$  با شیب ملایمی کاهش می‌یابد ولی در فاز نهایی تبلور نیز حضور دارد که ظاهراً با تبلور کانی‌های آمفیبول و بیوتیت در ارتباط است. در نمودار  $\text{MnO}$  نسبت به  $\text{SiO}_2$  یک نمونه گابرویی خارج از روند مورد انتظار قرار گرفته است که علت آن می‌تواند در ارتباط با دگرسانی سطحی باشد، زیرا در این فرایند  $\text{MnO}$  به راحتی از سنگ خارج شده و به صورت پیرولوزیت سنگ‌های میزبان را به رنگ خاکستری تیره در می‌آورد. چنین حالتی در مسیر جاده چالوس در بخش جنوبی توده مورد مطالعه دیده می‌شود. دامنه تغییرات  $\text{TiO}_2$  نسبت به  $\text{SiO}_2$  روندی افزایشی نشان می‌دهد. عنصر تیتانیم با شعاع یونی نزدیک به شعاع یونی  $\text{Fe}$  و  $\text{Mg}$  می‌تواند جانشین آنها شود و حتی با هم‌ارایی ۶ می‌تواند جانشین  $\text{Al}$

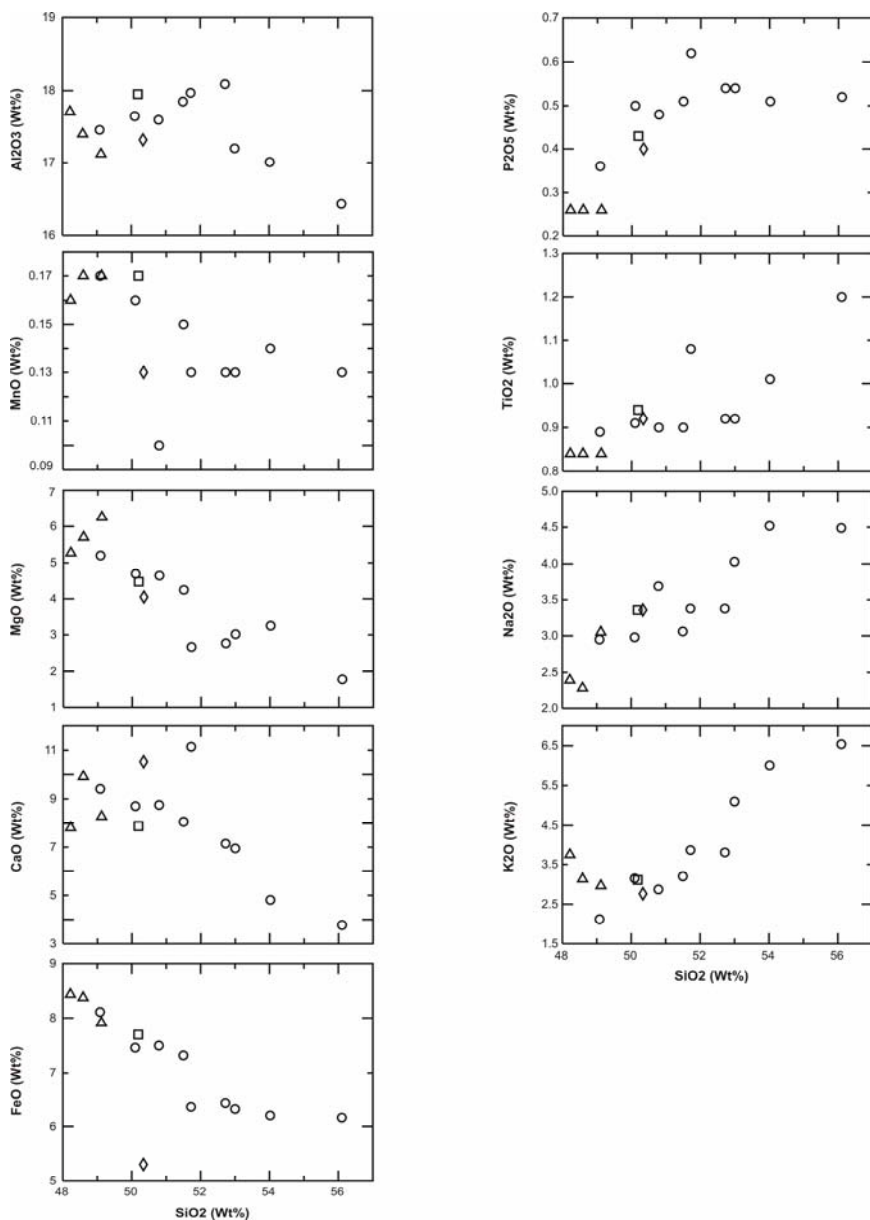
شود. بنابراین انتظار می‌رود که این عنصر در مراحل اولیه انجماد و تبلور ماگمایی در ساختار کانی‌های مافیک وارد شده و روندی نزولی داشته باشد؛ ولی چنانکه در شکل ۶ دیده می‌شود مقدار  $TiO_2$  نمونه‌های مورد مطالعه، با افزایش  $SiO_2$  افزایش نشان می‌دهد. این پدیده می‌تواند نتیجه فراوانی بیوتیت در سنگهای تفریق یافته‌تر (مونزونیت‌ها) باشد، زیرا بیوتیت یک کانی میزبان تیتانیوم است که انتظار می‌رود سنگ‌های حاوی این کانی،  $TiO_2$  بیشتری داشته باشند. همچنین  $TiO_2$  در ترمهای حدواسط و اسیدی می‌تواند به شکل ایلمنیت و به صورت ورود به درون بیوتیت و آمفیبول یافت شود. حضور ورودیهایی از سوزنهای روتیل در بیوتیت نمونه‌های مورد مطالعه مؤید این مطلب است؛ همچنین دگرسانی بیوتیت به کلریت و اسفن و اکسید آهن نیز می‌تواند موجب افزایش  $Ti$  در این سنگ‌ها شود.

مقادیر  $Na_2O$  و  $K_2O$  با افزایش  $SiO_2$  افزایش می‌یابند؛ شیب تغییرات  $Na_2O$  در مقایسه با شیب تغییرات  $K_2O$  ملایم‌تر است. بالا بودن مقدار  $Na_2O$  در ترم‌های اسید به دلیل مشارکت آن در ساختار کانی‌های در دمای پایین مثل آلکالی فلدسپارهای سدیک و بالا بودن مقدار  $K_2O$  به دلیل مشارکت آن در ساختار آلکالی فلدسپارهای پتاسیک و بیوتیت است. همچنین روند افزایشی  $P_2O_5$  در مقابل سیلیس می‌تواند مربوط به حضور مقادیر زیاد آپاتیت در سنگهای محصول پایانی تفریق و رفتار ناسازگار فسفر باشد.

**جدول ۳** نتایج آنالیز شیمیایی سنگ کل واحدهای مختلف توده نفوذی منطقه سد کرج. عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر کمیاب بر حسب ppm اند.

Sample	KN-95	KN-94	KN-11	KN-93	KN-92	KN-7	KN-23	KN-14	KN-15	KN-59	KN-16	KN-17	KN-18	KN-20
SiO <sub>2</sub>	۴۸,۲۲	۴۸,۵۹	۴۹,۰۸	۴۹,۱۲	۵۰,۱۰	۵۰,۱۹	۵۰,۳۴	۵۰,۷۹	۵۱,۵۰	۵۱,۷۲	۵۲,۷۲	۵۳,۰۰	۵۴,۰۲	۵۶,۱۰
TiO <sub>2</sub>	۰,۸۴	۰,۸۴	۰,۸۹	۰,۸۴	۰,۹۱	۰,۹۴	۰,۲	۰,۹۰	۰,۹۰	۱,۰۸	۰,۹۲	۰,۹۲	۱,۰۱	۱,۲۰
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۷,۷۱	۱۷,۴۰	۱۷,۴۶	۱۷,۱۲	۱۷,۶۵	۱۷,۹۵	۱۷,۳۲	۱۷,۶۰	۱۷,۸۵	۱۷,۹۷	۱۸,۰۹	۱۷,۲۰	۱۷,۰۱	۱۶,۴۴
FeO	۸,۴۳	۸,۲۷	۸,۱۱	۷,۹۱	۷,۴۶	۷,۷۰	۵,۳۱	۷,۵۰	۷,۳۲	۶,۳۷	۶,۴۴	۶,۳۳	۶,۱	۶,۱۷
MnO	۰,۱۶	۰,۱۷	۰,۱۷	۰,۱۷	۰,۱۶	۰,۱۷	۰,۱۳	۰,۱۰	۰,۱۵	۰,۱۳	۰,۱۳	۰,۱۳	۰,۱۴	۰,۱۳
MgO	۵,۲۷	۵,۷۰	۵,۲۰	۶,۲۵	۴,۷۰	۴,۴۸	۴,۰۵	۴,۶۵	۴,۲۵	۲,۶۷	۲,۷۷	۳,۰۲	۳,۲۵	۱,۷۸
CaO	۷,۸۱	۹,۹۱	۹,۴۱	۸,۲۷	۸,۷۰	۷,۸۸	۱۰,۵۳	۸,۷۵	۸,۰۶	۱۱,۱۴	۷,۱۵	۶,۹۵	۴,۸۱	۳,۷۸
Na <sub>2</sub> O	۲,۳۹	۲,۲۸	۲,۹۵	۳,۰۵	۲,۹۸	۳,۳۶	۳,۳۶	۳,۶۹	۳,۰۶	۳,۳۸	۳,۳۸	۴,۰۳	۴,۵۲	۴,۴۹
K <sub>2</sub> O	۳,۷۵	۳,۱۳	۲,۱۲	۲,۹۶	۳,۱۵	۳,۱۱	۲,۷۶	۲,۸۷	۳,۲۰	۳,۸۷	۳,۸۱	۵,۱۰	۶,۰۱	۶,۵۴
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰,۲۶	۰,۲۶	۰,۳۶	۰,۲۶	۰,۵۰	۰,۴۳	۰,۴۰	۰,۴۸	۰,۵۱	۰,۶۲	۰,۵۴	۰,۵۴	۰,۵۱	۰,۵۲
Sum	۹۴,۸۳	۹۶,۶۵	۹۵,۷۴	۹۵,۷۸	۹۶,۳۱	۹۶,۲۱	۹۵,۱۲	۹۷,۳۳	۹۶,۸۰	۹۹,۹۶	۹۵,۹۵	۹۷,۲۲	۹۷,۴۹	۹۷,۱۶
Ni	۳۶,۰۰	۴۰,۰۰	۳۶,۰۰	۸۳,۰۰	۳۴,۰۰	۲۸,۰۰	۳۱,۰۰	۳۵,۰۰	۳۲,۰۰	۱۳	۱۷,۰۰	۱۷,۰۰	۱۲,۰۰	۹,۰۰
Co	۳۱,۶۰	۳۴,۵۰	۲۸,۴۰	۳۱,۵۰	۲۷,۰۰	۲۴,۰۰	۱۵,۴۰	۲۹,۰۰	۱۶,۰۰	۱۵,۴	۱۶,۳۰	۱۵,۰۰	۱۲,۰۰	۱۰,۱۰
Sc	۲۹,۰۰	۳۴,۰۰	۲۵,۰۰	۲۷,۰۰	۲۲,۰۰	۲۲,۰۰	۲۱,۰۰	۵,۰۰	۲۰,۰۰	۳۰	۱۶,۰۰	۱۷,۰۰	۱۶,۰۰	۱۵,۰۰
V	۲۳۳,۰۰	۲۴۹,۰۰	۱۹۵,۰۰	۲۲۲,۰۰	۱۹۸,۰۰	۲۰۲,۰۰	۱۸۹,۰۰	۲۰۱,۰۰	۱۶۳,۰۰	۱۶۸	۱۵۰,۰۰	۱۴۵,۰۰	۱۲۲,۰۰	۱۰۱,۰۰
Cr	۶۳,۰۰	۷۶,۰۰	۷۲,۰۰	۱۸۰,۰۰	۵۷,۰۰	۵۳,۰۰	۴۷,۰۰	۶۸,۰۰	۳۷,۰۰	۱۳	۳۵,۰۰	۳۰,۰۰	۲۱,۰۰	۱۹,۰۰
Zn	۹۶,۰۰	۷۷,۰۰	۷۵,۰۰	۶۶,۰۰	۷۱,۰۰	۰,۰۵	۳۲,۰۰	۷۳,۰۰	۶۱,۰۰	۶۵,۴	۶۹,۰۰	۷۰,۰۰	۵۲,۰۰	۴۰,۰۰
Rb	۱۰۱,۰۰	۷۱,۱۰	۴۷,۹۰	۷۳,۴۰	۷۸,۰۰	۸۰,۰۰	۷۴,۰۰	۵۰,۰۰	۸۲,۰۰	-	۸۵,۶۰	۹۹,۰۰	۱۳۱,۰۰	۱۴۰,۰۰
Ba	۷۴۳,۰۰	۶۰۲,۰۰	۵۱۹,۰۰	۸۷۸,۰۰	۶۹۹,۰۰	۷۲۲,۰۰	۵۸۶,۰۰	۵۱۲,۰۰	۷۳۰,۰۰	۶۴۷	۷۳۵,۰۰	۸۲۵,۰۰	۹۸۰,۰۰	۱۰۶۰,۰۰
Sr	۸۹۰,۰۰	۶۲۸,۰۰	۶۰۶,۰۰	۰,۶۶۷	۶۰۸,۰۰	۶۰۹,۰۰	۶۳۲,۰۰	۵۸۹,۰۰	۵۹۸,۰۰	۵۹۸	۵۸۴,۰۰	۴۲۵,۰۰	۲۷۹,۰۰	۱۸۴,۰۰
Ga	۱۵,۰۰	۱۷,۰۰	۱۷,۰۰	۱۶,۰۰	۱۷,۰۰	۱۷,۰۰	۱۷,۰۰	۱۷,۰۰	۱۷,۰۰	-	۱۷,۰۰	۱۶,۰۰	۱۷,۰۰	۱۶,۰۰
Nb	۶,۰۰	۵,۰۰	۷,۰۰	۵,۰۰	۷,۰۰	۷,۰۰	۷,۰۰	۷,۰۰	۹,۰۰	-	۱۰,۰۰	۱۳,۰۰	۱۵,۰۰	۱۸,۰۰
Hf	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۳,۰۰	-	۳,۰۰	۴,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰
Zr	۶۸,۸۰	۶۷,۳۰	۶۴,۳۰	۵۰,۷۰	۵۸,۰۰	۵۸,۲۰	۶۵,۵۰	۶۶,۰۰	۹۷,۰۰	۲۶,۳	۹۷,۴۰	۱۰۲,۰۰	۱۵۶,۰۰	۱۶۵,۰۰

Y	۱۸۶۰	۱۹۳۰	۲۲۵۰	۱۷۴۰	۲۲۹۰	۲۳۵۰	۲۳۰۰	۲۲۰۰	۲۸۳۰	۲۲۳	۲۷۹۰	۳۲۰۰	۳۹۰۰	۴۴۳۰
Th	۳۳۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۱۰	۳۶۵	۳۷۰	۳۴۰	۳۳۰	۶۰۰	-	۵۸۰	۶۲۰	۷۵۰	۷۸۰
U	۱۰۷	۱۰۲	۰۹۴	۰۹۰	۰۹۱	۰۸۶	۰۸۷	۰۹۲	۱۰۵	-	۱۰۵۶	۱۸۵	۱۹۰	۲۱۷
Cs	۰۴۰	۱۰۰	۱۵۰	۰۷۰	۱۰۰	۰۹۰	۰۷۰	۱۰۵۵	۰۸۷	-	۰۹۰	۰۹۸	۱۲۰	۱۳۰
Ta	۰۵۰	۰۵۰	۰۵۰	۰۵۰	۰۵۵	۰۶۰	۰۵۰	۰۵۰	۰۶۰	-	۰۶۰	۰۶۰	۰۸۸	۰۹۰
La	۱۷۸۰	۱۸۰۰	۲۱۱۰	۱۶۶۰	۲۱۸۰	۲۲۲۰	۲۱۲۰	۲۱۲۰	۲۸۶۰	۲۹۲	۳۰۸۰	۳۴۳۰	۴۲۳۰	۴۶۵۰
Ce	۳۵۳۰	۳۴۷۰	۴۲۷۰	۳۲۳۰	۴۳۳۰	۴۵۱۰	۴۴۳۰	۴۲۵۰	۵۸۱۰	-	۶۱۳۰	۶۸۹۰	۸۵۰۰	۹۶۷۰
Nd	۱۷۶۰	۱۷۷۰	۲۲۵۰	۱۶۶۰	۲۳۰۰	۲۳۰۰	۲۲۹۰	۲۲۰۰	۲۷۱۲	-	۲۹۵۰	۳۲۱۰	۳۹۰۰	۴۶۸۰
Sm	۴۱۰	۴۱۰	۴۹۰	۳۶۰	۵۱۰	۵۴۰	۵۰۰	۴۸۵	۶۱۰	-	۶۲۰	۶۸۰	۸۹۰	۹۹۰
Eu	۱۰۴۴	۱۰۳۶	۱۰۴۷	۱۰۲۹	۱۰۵۲	۱۰۵۴	۱۰۴۱	۱۰۴۷	۱۰۶۸	-	۱۰۷۴	۱۰۲۲	۱۰۹۸	۱۰۱۰
Gd	۴۳۷	۴۳۹	۵۳۴	۴۰۰	۵۵۰	۵۶۵	۵۴۵	۵۴۰	۶۲۱	-	۶۴۵	۷۱۰	۸۸۰	۱۰۵۰
Dy	۳۶۰	۳۶۸	۴۱۳	۳۲۹	۴۲۰	۴۲۴	۴۲۲	۴۱۵	۴۹۸	-	۵۱۳	۶۱۰	۷۹۰	۸۲۸
Er	۲۰۴	۱۹۹	۲۵۵	۱۸۴	۲۵۹	۲۵۹	۲۴۶	۲۴۹	۲۸۰	-	۲۸۵	۳۱۰	۴۲۱	۴۹۵
Yb	۱۹۰	۱۹۰	۲۲۰	۱۷۰	۲۴۰	۲۵۰	۲۳۰	۲۱۵	۲۷۸	-	۲۸۰	۳۵۱	۴۱۰	۴۹۰
Tb	۰۶۴	۰۶۴	۰۷۸	۰۶۲	۰۷۷	۰۷۸	۰۷۶	۰۷۸	۰۹۲	-	۰۹۵	۱۰۱	۱۴۱	۱۵۳
Ho	۰۷۰	۰۶۶	۰۸۴	۰۶۸	۰۸۶	۰۸۷	۰۸۳	۰۸۱	۰۹۹	-	۱۰۱	۱۰۸	۱۵۲	۱۶۹
Tm	۰۲۹	۰۲۷	۰۳۴	۰۲۷	۰۳۵	۰۳۷	۰۳۶	۰۳۵	۰۴۰	-	۰۴۲	۰۴۹	۰۵۳	۰۷۲
Lu	۰۳۰	۰۲۹	۰۴۴	۰۲۸	۰۴۵	۰۴۵	۰۳۸	۰۴۴	۰۴۱	-	۰۴۲	۰۵۵	۰۷۵	۰۸۱
Pb	۲۰۰	۶۰۰	۹۰۰	۶۰۰	۰۸۰	۷۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۰۱۱	۶	۱۳۰۰	۱۲۰۰	۷۰۰	۷۰۰
Pr	۴۲۶	۴۳۲	۵۳۵	۴۰۰	۵۴۵	۵۵۶	۵۶۲	۵۴۱	۷۰۲	-	۷۵۰	۸۲۰	۹۸۹	۱۱۷۰
Rb,Sr	-۱۰۳۵	-۱۱۳	-۰۷۹	-۱۱	-۱۲۸	-۱۳۱۴	-۱۱۷۱	-۰۸۴۹	-۱۳۷۱	-	-۱۴۶۶	-۲۳۳	-۰۴۶۹۵	-۰۷۶۰۹





شکل ۶ تغییرات اکسیدهای عناصر اصلی نمونه‌های مورد مطالعه نسبت  $\text{SiO}_2$ . علائم:  $\diamond$  حاشیه انجماد سریع بالایی،  $\square$  حاشیه انجماد سریع پایینی،  $\triangle$  دولریت،  $\circ$  سایر نمونه‌ها.

### عناصر کمیاب

مقادیر عناصر کمیاب در جدول ۳ و تغییرات آنها در مقابل  $\text{SiO}_2$  در نمودارهای هارکر در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. تغییرات عناصر  $\text{Sr}$ ،  $\text{Rb}$ ،  $\text{Ba}$ ،  $\text{Zr}$ ،  $\text{Cs}$ ،  $\text{Nb}$ ،  $\text{Y}$  و  $\text{Hf}$  تطابق مثبتی با تغییرات  $\text{SiO}_2$  نشان می‌دهد و مقادیر آنها به ترتیب از گابرو به دیوریت و سپس به مونزونیت افزایش می‌یابد. مقدار استرانسیم از ۱۸۴ ppm تا ۸۹۰ ppm در سنگهای آذرین مورد مطالعه تغییر می‌کند. اندازه یونی استرانسیم نشان می‌دهد که این عنصر می‌تواند هم جانشین کلسیم و هم جانشین پتاسیم شود، بدین ترتیب که در کانی‌های کلسیم‌دار به صورت پذیرفته شده (به خاطر شعاع یونی بزرگتر) و در کانی‌های پتاسیم‌دار به صورت اسیر شده (به خاطر بار بیشتر)، حضور می‌یابد. فرآیند غالب خارج کردن استرانسیم از ماگما، پذیرفته شدن آن به جای کلسیم است [۱۱]. تغییرات مشابه  $\text{Sr}$  با  $\text{CaO}$  در نمونه‌های مورد مطالعه (شکل ۸) نشان دهنده جانشینی  $\text{Sr}$  در ساختمان پلاژیوکلازها است. چنانکه ملاحظه می‌شود در مقادیر تقریباً کمتر از ۷٪  $\text{CaO}$  تطابق خوبی بین  $\text{Sr}$  و  $\text{CaO}$  دیده می‌شود و در مقادیر بالاتر  $\text{CaO}$  مقدار  $\text{Sr}$  ثابت مانده است که دلیل آن می‌تواند با تقدم تبلور پیروکسنهای کلسیم‌دار در آغاز تبلور، و میزان کمتر تبلور پلاژیوکلاز که هر دو میزبان اصلی  $\text{Sr}$  هستند، مربوط باشد.

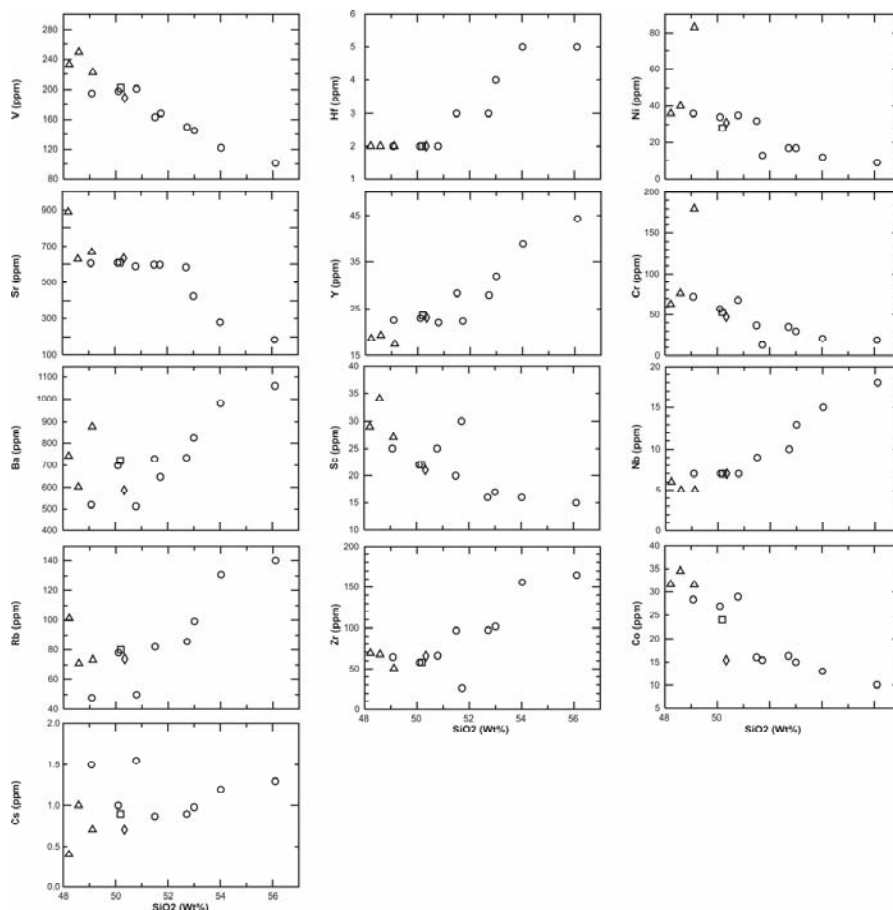
مقدار  $\text{Ba}$  در سنگ‌های آذرین مورد مطالعه از ۵۱۲ ppm تا ۱۰۶۰ ppm تغییر کرده و روی هم رفته روندی افزایشی را در مقابل  $\text{SiO}_2$  نشان می‌دهد. این عنصر جزء

عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LIL) است و بسیار متحرک و ناسازگار است ( $Kd < 1$ ) و نمی‌تواند در سنگ‌های آذرین کانی مستقلی را تشکیل دهد [۱۱]. از آنجاکه این عنصر در شبکه سیلیکات‌های گرمایی بالا شرکت نمی‌کند، بنابراین مقدار آن همواره طی تفریق ماگمایی افزایش می‌یابد و به همراه پتاسیم در فازهای پایانی وارد ساختمان آلکالی فلدسپارها و بیوتیت و تا حدودی هورنبلند می‌شود [۱۲]. در نمونه‌های مورد مطالعه نیز تغییرات Ba شبیه Ca بوده (شکل ۶ و ۷) و این عنصر احتمالاً در ساختار پلاژیوکلازها وارد شده است.

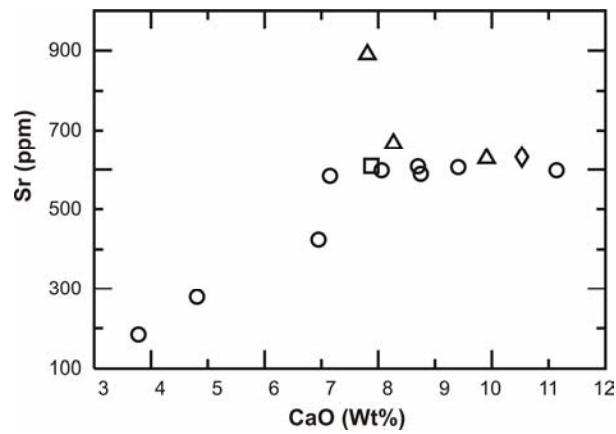
مقدار Rb از ۴۷ ppm تا ۱۴۰ ppm تغییر کرده و مانند Ba تطابق مثبت با  $SiO_2$  نشان می‌دهد. شیب مثبت این نمودار (شکل ۷) نشانگر افزایش این عنصر طی روند تفریق است. روند افزایشی Rb با  $K_2O$  (شکل ۹) می‌تواند نشان دهندهٔ جانشینی Rb در ساختار آلکالی فلدسپار باشد.

مقدار Zr از ۲۶ ppm تا ۱۵۶ ppm تغییر کرده و روندی افزایشی در مقابل  $SiO_2$  نشان می‌دهد. زیرکنیم جزء عناصر لیتوفیل با بار یونی زیاد (HFS) و کم تحرک است و با  $Kd < 1$  جزء عناصر ناسازگار است [۱۱] به طور کلی مقدار زیرکنیم در نمونه‌های مورد مطالعه با پیشرفت روند تفریق افزایش می‌یابد (شکل ۷).

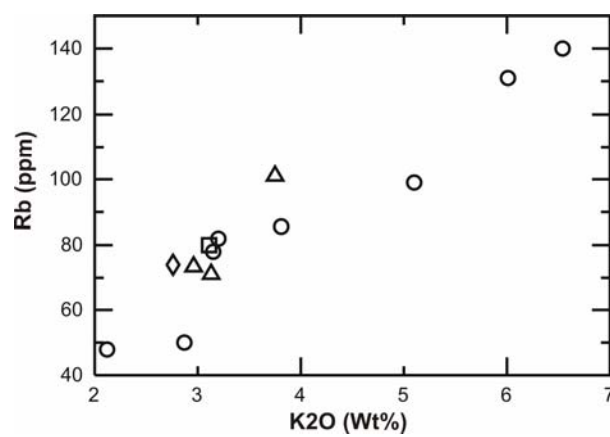
مقدار Y روندی افزایشی در مقابل  $SiO_2$  نشان می‌دهد. این عنصر شبیه عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) رفتار کرده و در آمفیبول، و به مقدار کمتر در پیروکسن وارد می‌شود [۱۱]. حضور آن در فازهای فرعی از قبیل اسفن و آپاتیت نیز می‌تواند روی فراوانی این عنصر تأثیر بگذارد. شیب مثبت آن احتمالاً در ارتباط با حضور کانی‌های فرعی از قبیل آمفیبول، اسفن و آپاتیت در فازهای انتهایی تفریق است. Ni، Co، V و Sc رفتار ژئوشیمیایی عناصر سازگار از خود نشان داده و با  $SiO_2$  یک تطابق منفی نشان می‌دهند که مؤید روند تفریق است.



شکل ۷ تغییرات عناصر کمیاب نمونه‌های مورد مطالعه نسبت  $\text{SiO}_2$ . علائم مشابه شکل ۶ انتخاب شده‌اند.



شکل ۸ نمودار CaO-Sr نمونه‌های مورد مطالعه. علائم مشابه شکل ۶ انتخاب شده‌اند.



**K<sub>2</sub>O(Wt%)**

شکل ۹ نمودار K<sub>2</sub>O-Rb نمونه‌های مورد مطالعه. علائم مشابه شکل ۶ انتخاب شده‌اند.

**بحث****شواهد شیمی-کانی‌شناسی تفریق**

کلینوپیروکسن‌های انواع مختلف سنگ‌های آذرین بنیان سد کرج شباهت‌های بسیاری با یکدیگر دارند و همه آنها در قلمرو پیروکسن‌های کلسیم، منیزیم و آهن‌دار و در محدوده اوزیوت-دیوپسید قرار می‌گیرند. از سنگ‌های حاشیه انجماد سریع و گابروها به سمت سنگ‌های مونزونیتی به پیروی از افزایش درجه تفریق، فراوانی عناصر اصلی کلینوپیروکسن‌ها دستخوش تغییرات منظم و تدریجی می‌شود. کلینوپیروکسن‌های موجود در سنگ‌های حاشیه انجماد سریع و گابرو در مقایسه با مونزونیت‌ها از عناصر Mg, Al, Ti, Ca غنی‌تر و از Fe فقیرتر هستند.

علت کم بودن TiO<sub>2</sub> پیروکسن مونزونیت‌ها نسبت به گابروها و نمونه‌های حاشیه انجماد سریع با فراوانی بیشتر کانی‌های تیتانیم دار نظیر تیتانومنیست در مونزونیت‌ها می‌تواند قابل توجیه باشد. به عبارت دیگر تبلور تیتانومنیست بیشتر در مونزونیت‌ها باعث خروج Ti از ماگما و فقر این عنصر در پیروکسن‌های همزیست با آن‌ها شده است. کاهش Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در پیروکسن مونزونیت‌ها نسبت به سنگ‌های حاشیه انجماد سریع و گابروها نیز مربوط به فراوانی کانی‌های آلومینیم‌دار نظیر پلاژیوکلاز در مونزونیت‌هاست، زیرا با تبلور پلاژیوکلاز، Al موجود در ماگما وارد شبکه این کانی شده و لذا پیروکسن‌های همزیست با این کانی از Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> فقیرتر شده‌اند؛ در حالی که پیروکسن گابروها پیش از تبلور پلاژیوکلازها، و بنابراین زمانی که ماگما غنی از Al بوده است متبلور شده‌اند. افزایش مقدار Na<sub>2</sub>O پیروکسن مونزونیت‌ها در مقایسه با سنگ‌های حاشیه انجماد سریع و گابروها نیز مربوط به ناسازگاری Na در ماگماست که طی تفریق میزان این عنصر در ماگمای تحول یافته، افزایش یافته و در نتیجه این عنصر توانسته است تا حدی وارد شبکه پیروکسن شود.

فلدسپار نمونه‌های گابرویی در محدوده بیتونیت و لابرادوریت، نمونه‌های حاشیه انجماد سریع در محدوده لابرادوریت و نمونه‌های مونزونیتی در محدوده الیگوکلاز و آلبیت قرار می‌گیرند. این تغییرات نشان دهنده کاهش کلسیم از سنگ‌های گابرویی به نمونه‌های مونزونیتی است که با روند تفریق ماگما از گابروها به مونزونیت‌ها تطابق دارد.

معمول‌ترین ساز و کار تفریق جدایش بلورها به روش تهنشست گرانشی است. به طور کلی ماگماها در دمای یکسان در حدود ده درصد سبکتر از کانی و یا سنگ معادل خود هستند [۱۲]، به همین دلیل احتمال تهنشست بلورهای تشکیل شده بیش از احتمال شناور ماندن آنهاست. با وجود این، اختلاف چگالی تنها عامل تعیین کننده در سرعت تهنشست و ترتیب تهنشینی بلورها نیست بلکه عوامل مهم دیگری مانند قطر بلورها، گرانیروی ماگما، نرخ تبلور، سرعت سرد شدن و وجود یا فقدان جریان‌های همرفتی نیز باید مورد توجه قرار گیرند. به علاوه تفریق ممکن است به روش انتشار گرمایی، انتشار گرانشی، جریان ماده آبگون، پالایش فشاری، هسته‌بندی انتخابی، و ناآمیختگی شاره‌ها نیز به وقوع پیوندد [۱۳]. در مجموعه سنگ‌های مورد مطالعه مهم‌ترین ساز و کار تفریق، جدا شدن فاز بلورین است. اما بعضی از نمودارها مؤید تفریق به روش انتشار گرانشی نیز هستند، به عنوان مثال مقایسه تغییرات آهن و منیزیم در نمونه‌های حاشیه انجماد سریع پائینی و بالایی و نیز تغییر مقدار منیزیم در پیروکسن‌های این دو گروه از سنگ‌ها، نشان می‌دهند که بین عناصر آهن و منیزیم در کرانه بالایی و پائینی یک تفریق صورت گرفته است، به طوری که سنگ‌های کرانه بالایی از منیزیم و سنگ‌های کرانه پائینی از آهن سرشارترند. این امر نشان می‌دهد که پیش از تبلور ماگما، عنصر سنگین آهن به روش انتشار گرانشی به بخشهای پائینی سقوط کرده و در واقع یک نوع تفریق به روش انتشار گرانشی رخ داده است.

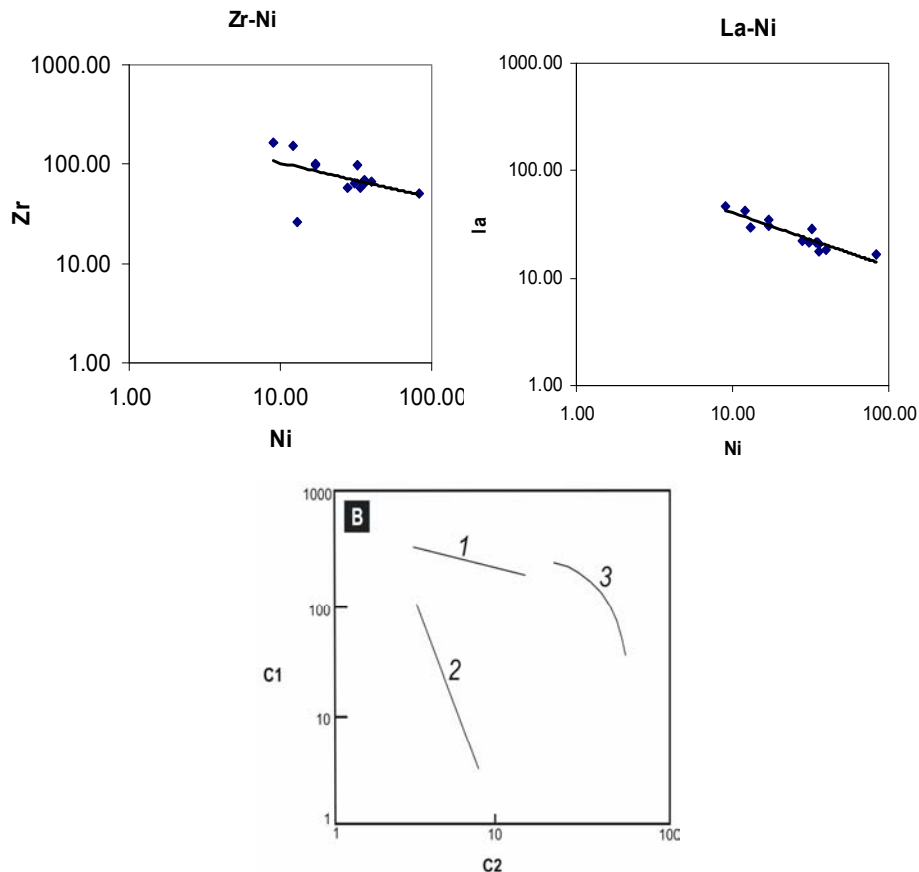
#### شواهد شیمی سنگ کل تفریق

اخیراً فرایند تفریق به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است ([۱۴]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۷]، [۱۸]). به طور کلی تغییرات عناصر اصلی و کمیاب در مقابل  $\text{SiO}_2$  نمونه‌های مورد مطالعه، نشان دهنده یک ارتباط زایشی در سنگ‌های آذرین مختلف مورد مطالعه‌اند. اما این تغییرات (نمودارهای هارکر) به راحتی قادر نیستند فرایندهای حاکم بر فرایندهای ماگمایی مانند تشخیص ذوب بخشی از تبلور بخشی و یا اختلاط ماگمایی را به نمایش گذارند [۱۹] و [۲۰]. به عنوان مثال در هر دو فرایند ذوب و تبلور بخشی با افزایش  $\text{SiO}_2$ ، اکسیدهای  $\text{CaO}$  و  $\text{MgO}$  و عناصر سازگاری از قبیل  $\text{V}$ ،  $\text{Sc}$ ،  $\text{Ni}$  در حالت مذاب به تدریج کاهش و اکسیدهای  $\text{K}_2\text{O}$  و  $\text{Na}_2\text{O}$  و عناصر ناسازگار  $\text{Rb}$ ،  $\text{Th}$ ،  $\text{Zr}$  افزایش می‌یابند و عملاً در این خصوص تفاوت روشنی بین فرایند ذوب و تبلور بخشی دیده نمی‌شود. در عوض شدت تغییرات عناصر سازگار و ناسازگار طی فرایند ذوب و تبلور بخشی متفاوت است. در فرایند ذوب بخشی عناصر ناسازگار بیشترین تغییرات را از خود نشان داده و عناصر سازگار تقریباً بدون تغییر باقی می‌مانند، در صورتی که در فرایند تبلور بخشی به دلیل اینکه عناصر سازگار

تمایل شدیدی برای ورود به ساختار کانی‌ها را دارند لذا تغییرات این عناصر شدید ولی عناصر ناسازگار تقریباً بدون تغییر باقی می‌مانند.

آلین کوشیری [۱۴] با تکیه بر مطالب بالا و با استفاده از نمودارهای لگاریتمی، روشی برای تشخیص سه فرایند مهم ذوب بخشی، تبلور بخشی و اختلاط ماگمایی ارائه کرد. در این روش از یک عنصر کمیاب کاملاً ناسازگار (مانند Rb و Th، یا Zr) در محور قائم نسبت به یک عنصر کاملاً سازگار (S<sub>g</sub> Ni, Co, ...) در محور افقی، استفاده می‌شود. اگر نقاط نماینده نمونه‌ها، یک خط راست و تقریباً افقی باشد، به احتمال قوی تبلور بخشی و اگر یک خط راست و تقریباً قائم حاصل شود، ذوب بخشی و در صورتی که روند تغییرات طوری باشد که با افزایش در جهت Xها و Yها یک منحنی کاو تشکیل شود فرایند مؤثر در فرایند ماگما به احتمال قوی اختلاط ماگمایی بوده است.

در شکل (۱۰) نمودارهای LogLa-LogNi و LogZr-LogNi مجموعه نمونه‌های سنگهای آذرین بنیان سد کرج آورده شده‌اند. چنانکه ملاحظه می‌شود روند نمونه‌های مورد مطالعه نشان دهنده تبلور بخشی هستند.



شکل ۱۰ نمودار لگاریتمی عناصر سازگار نسبت به عناصر ناسازگار نمونه‌های مورد مطالعه، Zr-Ni (B), La-Ni (A) و (C) نمودار کوشیری [14]. منحنی‌های a و b و c در نمودار C به ترتیب نشان دهنده فرایندهای ذوب بخشی، تبلور بخشی و اختلاط ماگمایی هستند.

### برداشت

پس از پایان آتشفشانی ائوسن، مخزن ماگمایی پر شده در زیر حوضه تهنشستی-آتشفشانی سازند کرج نخست به صورت استوک دولریتی در این سازند نفوذ کرده و سپس در جریان پیشرفت چین خوردگی لایه‌های مذکور در منطقه به صورت یک توده نفوذی بین اعضای توف میانی و بالایی در تراز شیل آسارا تزریق شده است. این توده نفوذی در حاشیه‌های پایینی و بالایی دستخوش انجماد سریع شده و سبب تشکیل بافت پرفیری مشخصی در این سنگ‌ها شده است. حاشیه انجماد سریع نامبرده موجب شد تا ماگما بتواند به آرامی سرد شده و فرصت کافی برای ایجاد یک توالی تفریقی مشخصی را از گابرو در پائین به دیوریت و سپس مونزونیت در بالا فراهم آورد. گذر از هریک از این بخشها به دیگری کاملاً تدریجی بوده و شواهد شیمی سنگ کل و شیمی کانی‌ها نیز آنرا تأیید می‌نمایند. افزایش مقدار منیزیم ( $Mg^{#}$ ) پیروکسن‌ها، درصد آنورتیت پلاژیوکلازها و تغییرات سریع عناصر سازگار (مانند Ni, V, ... در مقابل عناصر ناسازگار (مانند Th, Rb, ...)) از پائین به بالای توده مؤید عملکرد این فاز تفریقی است.

بر اساس آنالیزهای میکروپروب الکترونی، پیروکسن نمونه‌های مورد مطالعه در کران چائیده بالایی از منیزیم و در حاشیه پائینی از آهن سرشارترند. این امر نشان می‌دهد که تفریق به روش انتشار گرانشی عناصر در ماگمای همگن اولیه پیش از تشکیل حاشیه انجماد سریع رخ می‌دهد و موجب بالا رفتن نسبت آهن به منیزیم در کران چائیده پائینی نسبت به کران بالایی شده است، اما با توجه به تغییر ترکیب مجموعه سنگ‌های منطقه مورد مطالعه از گابرو در پائین به دیوریت و مونزودیوریت و سپس مونزونیت در بالا، ساز و کار اصلی تفریق به خصوص با توجه به شکل خاص توده، تفریق به روش جدایش بلورها بوده است.

### تشکر و قدردانی

هزینه این پژوهش از محل طرح تحقیقاتی شماره ۵۱۲/۴/۶۳۵ مصوب شورای پژوهشی دانشگاه تهران تامین شده است که بدینوسیله از آن شورای محترم تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از جناب آقای دکتر محمود صادقیان عضو محترم هیئت علمی دانشگاه صنعتی شاهرود که آنالیزهای میکروپروب الکترونی را در فرانسه انجام داده است صمیمانه سپاسگزاریم.

## مراجع

- [1] Riviere A., "Remarque sur la stratigraphie de la base de L, Elbourz Central: c.r.scanc", Acad. Sci.paris, 192 (1931), 1246-1247.
- [2] Bailley E.B., Jones R.C.B., Asfia S., "Notes on the geology of the Elburz Mountains, northeast of Tehran, Iran", Q. J. Geol. Soc. London. 104, pt.1, no.413, (1948) 1-42.
- [3] Ganser A., Huber H., "Geological observations in the central Elburz, Iran, Schweiz miner. Petrogy", Mitt. 42(2) (1962) 583-630.
- [4] Dellenbach J., "Contriboution a letude geologique de la region situee a L'est de Tehran (Iran)", Fac. Sci. Univ. strassburg (France) (1964) 117.
- [۵] زرعیان س.، فیاض ح.، "بررسی کانی شناسی سنگ‌های بلورین ایران"، مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ۹۰۷ (۱۳۴۳) ص ۴۷-۴۷.
- [6] Dedval E., "Zur Geologie des mittleren und unteren karaj Tales, zental Elburz (Iran)", mitt. Geol. inst. E. T. H. U. univ. Zurrich, n.s. 76 (1967) 125.
- [۷] ولی‌زاده م.و.، "بررسی پترولوژی توده آذرین بنیان سد کرج"، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۱۶، شماره ۱ و ۲ (۱۳۶۶) ص ۲۷-۵.
- [۸] نورالهی ز.، "پترولوژی و ژئوشیمی توده نفوذی بنیان سد کرج"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم دانشگاه تهران (۱۳۸۳) ۱۳۰ صفحه.
- [9] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "An introduction to the rock-forming minerals", Longnan, New york, ISBN 0-470-20516-4(USA) (1992).
- [10] Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginzburg I.V., Ross M., Seifert F.A., Zussman J., Akoi K., Gottaridi, G., "Nomenclature of pyroxenes", Mineral. Mag. 65 (1988) 1-28.
- [11] Rollinson H.R., "Using geochemical data" Evaluation, presentation, interperetation", London unwin Hyman (1993).
- [12] Philpotts A.R., "Principles of igneous and metamorphic petrology", (1990) 384-387.
- [13] Wilson M., "Igneous Petrogenesis", London unwin Hyman 466p (1989).
- [14] Cocherie A., "Systematic use of trace element distribution pattern in Lg-Log diagrams for plutonic suite", Geochemica and cocmochemica Ata, 50 (1986) 2517-2522.
- [15] Fu-yuan Wu., Bor-ming J., Simon A., Wilde Ching-Hua Lo., Tzen-Fu Yui Qiang L., Wen-chun G., De-you S., "Highly fractionated I-type granites in NE China (II): isotopic geochemistry



- and implications for crustal growth in the Phanerozoic*", Lithos 67, Issues 3 (2003) 191-204.
- [16] Fu-yuan Wu., De-you S., Bor-ming J., Wilde S., "A Jurassic garnet-bearing granitic pluton from NE China showing tetrad REE patterns", J. of Asian Earth Sciences, 23 Issue 5 (2004) 731-744.
- [17] Olivier F., Nicolas C., Stéphane B., Daniel D., "Emplacement processes and cooling history of layered cyclic unit II-7 from the Lovozero alkaline massif (Kola Peninsula, Russia)", Lithos, (2005) In Press.
- [18] Philippe M., François B., Henriette L., Hans-Rudolf P., "Modeling of in-situ crystallization processes in the Permian mafic layered intrusion of Mont Collon (Dent Blanche nappe, western Alps)", Lithos, (2005) In Press.
- [19] F. Bea G.B., Fershtater P., Montero V.N., Smirnov J.F., "Deformation-driven differentiation of granitic magma: the Stepninsk pluton of the Uralides, Russia", Lithos 81, Issues 1-4, (2005) 209-233.
- [20] Takeshi K., "Magmatic differentiation examined with a numerical model considering multicomponent thermodynamics and momentum, energy and species transport", Lithos 74, Issues 3-4 (2004) 117-130.