



شیمی کانی‌ها و ترموبارومتري پريدوتيت گوشته‌اي افیوليت ملانژ شمال غرب بيرجند، شرق ايران

زهرة سليمي، محمدحسين زرین کوب*، سيدسعید محمدی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت مقاله: ۹۰/۱۰/۱۲، نسخه نهایی: ۹۱/۳/۱۹)

چکیده: منطقه‌ی مورد بررسی در شمال غربی بیرجند، بخش شمالی زون جوش خورده‌ی سیستان، در شرق ایران واقع شده است. رخنمون‌هایی وابسته به یک مجموعه‌ی افیولیت ملانژ در این منطقه وجود دارد. اجزای سازنده‌ی این مجموعه شامل هارزبورژیت، گابرو و بازالت اسپیلیتی به همراه سنگ‌های نوع فلیش‌اند. نتایج بررسی‌های ریز پردازش الکترونی در هارزبورژیت‌ها بیانگر این است که یوبین از نوع فورستريت ($Fe_{0.15}Fe_{0.75}$)، ارتوپيروکسن از نوع انستاتیت ($Mg^{\#} = 91.58$)، کلینوپيروکسن از نوع اوژیت دیوپسیدی ($Mg^{\#} = 95.8$) و اسپینل (با عدد کروم ۴۱) از نوع آلومینیوم کروم‌دارند. ترموبارومتري کانی‌های کلینوپيروکسن و ارتوپيروکسن، دمای تبلور پريدوتيت‌ها را 1016 ± 100 درجه‌ی سانتی‌گراد در فشار ۲۵ کیلوپار نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: افیولیت ملانژ؛ هارزبورژیت؛ ترموبارومتري؛ بیرجند؛ زون جوش خورده‌ی سیستان.

مقدمه

مجموعه‌ی سنگی به صورت مجموعه‌ی بهم ریخته افیولیت ملانژی در شرق ایران از جمله در شمال غرب بیرجند، رخنمون یافته است. ترکیب سنگ‌های گوشته‌ای وابسته به افیولیت‌ها که به عنوان باقیمانده‌های ذوب بخشی تصور می‌شوند، می‌توانند اطلاعات مهمی درباره‌ی ماهیت ذوب بخشی، خاستگاه گدازه و محیط تکتونوماگمایی تشکیل افیولیت‌ها ارائه دهند. در این راستا شیمی کانی‌های موجود در بخش گوشته‌ای افیولیت‌ها برای تشخیص ماهیت و نوع کانی‌های موجود، خاستگاه تشکیل آنها و تعیین دما و فشار تعادلی در پريدوتيت‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷-۹]. در این پژوهش سعی بر آن است تا با بررسی شیمی کانی‌ها در بخش پريدوتيتی افیولیت ملانژ شمال غربی بیرجند، ماهیت و نوع کانی‌های موجود، خاستگاه و دمای تعادلی بخش گوشته‌ای افیولیت ملانژ مورد بررسی، برآورد شود.

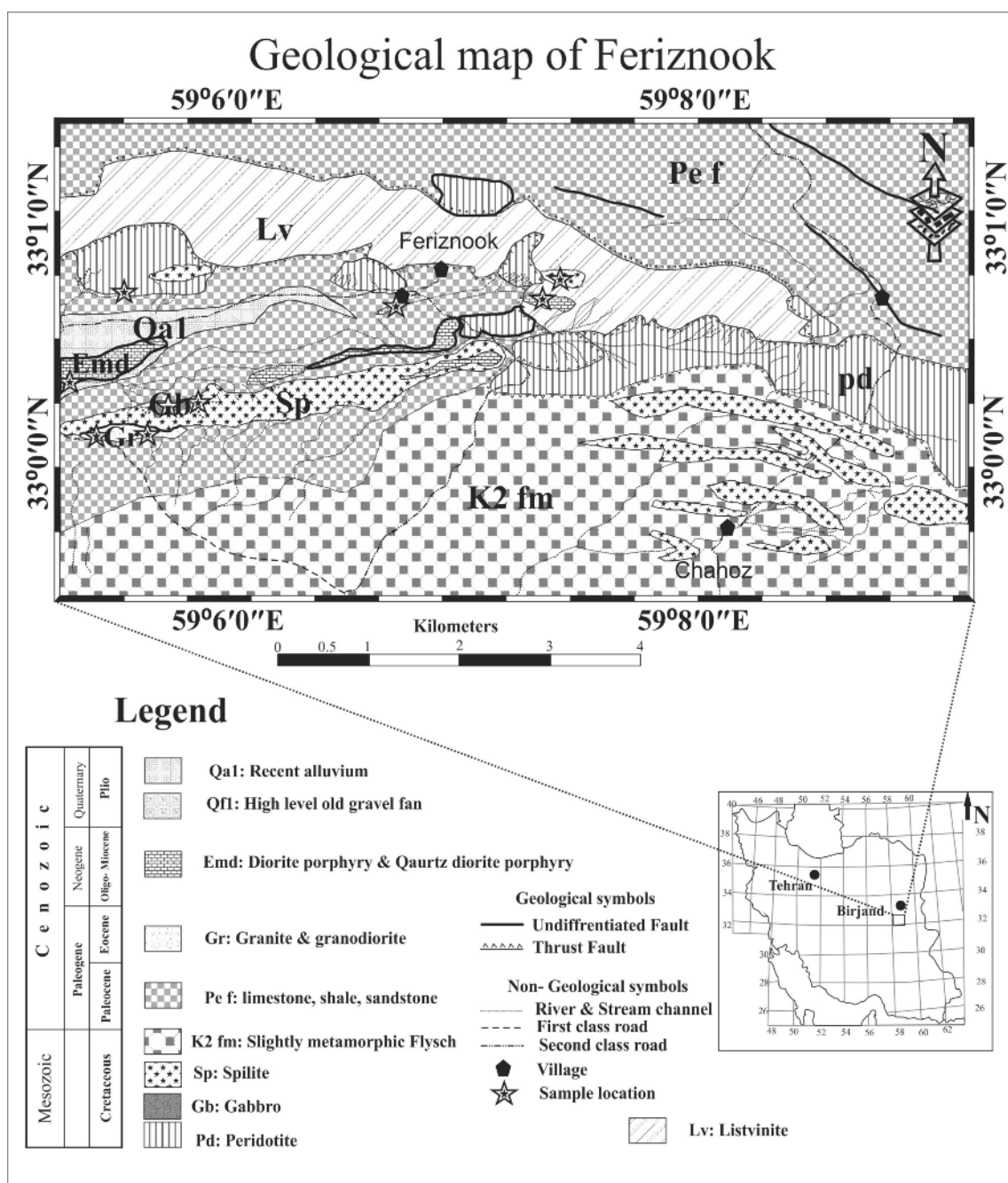
منطقه‌ی مورد بررسی در فاصله‌ی ۲۵ کیلومتری شمال غربی بیرجند، با طول جغرافیایی شرقی $59^{\circ}11'11''$ تا $59^{\circ}9'8''$ و عرض جغرافیایی شمالی $32^{\circ}59'37''$ تا $33^{\circ}1'44''$ ، در نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ روم [۱] (شکل ۱) و در بخش شمالی زون جوش خورده‌ی سیستان واقع شده است. زون جوش خورده‌ی سیستان، زمیندرز ناشی از برخورد بلوک قاره‌ای لوت با افغان است [۲]. باریکه‌ی اقیانوسی بین پهنه‌ی لوت و افغان در کرتاسه پیشین (آپسین تا آلبین) وجود داشته است [۳]. بررسی‌های اخیر [۴-۶] حاکی از بسته شدن اقیانوس یادشده، بیش از ۸۶ میلیون سال پیش (اوایل کرتاسه فوقانی) است. بسته شدن این باریکه‌ی اقیانوسی باعث فرارنده شدن قطعاتی از سنگ کره‌ی اقیانوسی به حاشیه قاره شده که این

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۵۶۱۰۵۱۸، نمابر: ۲۵۰۲۰۴۱ (۰۵۶۱)، پست الکترونیکی: Zarrinkoub@yahoo.com

روش بررسی

پس از بررسی‌های صحرایی و نمونه برداری به منظور بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی، از نمونه‌های هارزبورژیت منطقه، مقاطع نازکی تهیه شدند و سپس از نمونه‌های مناسب مقاطع نازک- صیقلی تهیه و ۳۰ نقطه الیوین، ۲۷ نقطه پیروکسن و ۳۰ نقطه اسپینل موجود در نمونه‌های هارزبورژیت منطقه با استفاده از ریزپردازنده الکترونی Cameca SX-

۱۰۰ با ولتاژ شتاب‌دهنده‌ی ۲۰Kv و جریان ۱۵nA در گروه علوم زمین دانشگاه مانسر آلمان آنالیز شدند. در محاسبه‌ی مقدار Fe^{2+} و Fe^{3+} برای دسترسی به فرمول ساختاری کانی‌ها از موازنه‌ی شیمیایی کانی‌ها و روش ارائه شده توسط [۱۰] استفاده شد. ترموبارومتری با نرم افزار PTMAFIC [۱۱] و رده‌بندی کانی‌ها با نرم‌افزار Minpet 2.02 انجام شد. نتایج آنالیز نقطه‌ای کانی‌ها، در جدول‌های ۱، ۲، ۳ آورده شده‌اند.



شکل ۱ نقشه‌ی زمین شناسی منطقه‌ی مورد بررسی.

جدول ۱ آناليز ريزپردازشي اليوين در هارزبورژيت بر اساس درصد وزني و فرمول ساختاري بر اساس ۸ اكسيژن.

Sample No	H _z x	H _z	H _z	H _z	H _z	H _z	H _z	H _z	H _z	H _z
	Ol-134	Ol-135	Ol-136	Ol-137	Ol-138	Ol-139	Ol-140	Ol-141	Ol-142	Ol-143
SiO ₂	۴۰.۹۶	۴۱.۰۶	۴۰.۷۶	۴۰.۹۵	۴۱.۱۸	۴۰.۷۰	۴۱.۱۹	۴۱.۰۶	۴۱.۲۲	۴۱.۰۵
TiO ₂	۰.۰۳	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۰
Al ₂ O ₃	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰
Cr ₂ O ₃	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۳
FeO*	۹.۰۷	۹.۱۶	۹.۱۲	۹.۳۳	۹.۵۴	۹.۱۲	۹.۲۳	۹.۲۹	۹.۱۲	۹.۲۱
MnO	۰.۱۲	۰.۱۵	۰.۱۱	۰.۱۰	۰.۱۸	۰.۰۹	۰.۱۲	۰.۱۵	۰.۱۱	۰.۱۳
MgO	۴۹.۷۹	۴۹.۶۳	۴۹.۵۷	۵۰.۲۰	۵۰.۷۰	۵۰.۵۸	۴۹.۷۹	۵۰.۲۳	۴۹.۷۵	۵۰.۱۲
CaO	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۲
Na ₂ O	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
K ₂ O	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۳
Total	۱۰۰.۰۰	۱۰۰.۰۴	۹۹.۷۹	۱۰۰.۶۲	۱۰۰.۴۱	۱۰۰.۵۰	۱۰۰.۳۷	۱۰۰.۰۴	۹۹.۷۹	۱۰۰.۵۹
Si	۱.۰۰۰	۱.۰۰۳	۱.۰۰	۰.۹۹۳	۱.۰۰	۰.۹۹	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۹۹
Ti	۰.۰۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Al	۰.۰۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Cr	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Fe ⁺²	۰.۱۸۵	۰.۱۸۷	۰.۱۸۰	۰.۱۷۶	۰.۱۸	۰.۱۶	۰.۱۹	۰.۱۹	۰.۱۸	۰.۱۸
Fe ⁺³	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱
Mn	۰.۰۰۲	۰.۰۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Mg	۱.۸۱۱	۱.۸۰۷	۱.۸۱۴	۱.۸۱۵	۱.۸۱۱	۱.۸۲۷	۱.۸۱	۱.۸۱	۱.۸۱	۱.۸۲
Ca	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Te	۰.۱۲	۰.۱۶	۰.۱۱	۰.۱۰	۰.۱۹	۰.۰۹	۰.۱۲	۰.۱۰	۰.۱۵	۰.۱۳
Sum	۳.۱۲۴	۳.۱۵۵	۳.۱۱۴	۳.۱۰۲	۳.۱۸۵	۳.۰۹۲	۳.۱۲۴	۳.۱۰۲	۳.۱۵۵	۳.۱۳۳
Fo	۹۰.۶۲	۹۰.۴۵	۹۰.۵۶	۹۰.۴۵	۹۰.۶۲	۹۰.۷۵	۹۰.۶۲	۹۰.۴۵	۹۰.۵۶	۹۰.۴۵
Fa	۹.۲۶	۹.۳۷	۹.۳۱	۹.۴۳	۹.۱۷	۹.۱۶	۹.۲۶	۹.۳۷	۹.۳۱	۹.۴۳
Mg [#]	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۲	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱

* Hz = Harzburgite

دنباله جدول ۱

Sample No	H _z	H _z	H _z	H _z	H _z	H _z	H _z	H _z	H _z	H _z
	Ol-144	Ol-145	Ol-146	Ol-147	Ol-148	Ol-149	151-Ol	Ol-152	Ol-153	Ol-154
SiO ₂	۴۱.۸۷	۴۰.۹۳	۴۰.۹۴	۴۰.۸۲	۴۱.۰۷	۴۰.۸۴	۴۰.۶۱	۴۰.۸۶	۴۰.۹۹	۴۰.۴۳
TiO ₂	۰.۰۲	۰.۰۴	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Al ₂ O ₃	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱
Cr ₂ O ₃	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۲
FeO*	۹.۰۸	۹.۰۲	۹.۲۴	۹.۲۷	۹.۱۱	۹.۱۹	۹.۲۸	۹.۲۳	۹.۵۳	۹.۱۴
MnO	۰.۱۰	۰.۱۷	۰.۱۵	۰.۱۰	۰.۱۰	۰.۱۵	۰.۱۲	۰.۰۹	۰.۱۶	۰.۱۵
MgO	۵۰.۱۱	۴۹.۵۴	۵۰.۴۷	۵۰.۰۱	۴۹.۵۱	۵۰.۰۴	۴۹.۹۶	۴۹.۳۸	۴۹.۸۱	۴۸.۸۸
CaO	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰
Na ₂ O	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۲
K ₂ O	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۱
Total	۱۰۰.۲۰	۹۹.۷۷	۱۰۰.۸۳	۱۰۰.۲۶	۹۹.۸۲	۱۰۰.۲۶	۱۰۰.۰۳	۹۹.۵۸	۱۰۰.۵۳	۹۹.۶۵
Si	۰.۹۹	۱.۰۰	۰.۹۹	۰.۹۹	۱.۰۰	۰.۹۹	۰.۹۹	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰
Ti	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Al	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Cr	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Fe ⁺²	۰.۱۷	۰.۱۸	۰.۱۷	۰.۱۸	۰.۱۹	۰.۱۸	۰.۱۷	۰.۱۹	۰.۱۹	۰.۱۹
Fe ⁺³	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰
Mn	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Mg	۱.۸۱	۱.۸۰	۱.۸۲	۱.۸۱	۱.۸۱	۱.۸۲	۱.۸۲	۱.۸۱	۱.۸۱	۱.۸۱
Ca	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Te	۰.۱۰	۰.۱۸	۰.۱۵	۰.۱۰	۰.۱۰	۰.۱۵	۰.۱۲	۰.۰۹	۰.۱۶	۰.۱۶
Sum	۳.۱۰۳	۳.۱۷۷	۳.۱۵۳	۳.۱۰۳	۳.۱۰۴	۳.۱۵۴	۳.۱۲۳	۳.۰۹۴	۳.۱۶۵	۳.۱۵۸
Fo	۹۰.۵۶	۹۰.۷۵	۹۰.۵۸	۹۰.۴۸	۹۰.۵۱	۹۰.۵۲	۹۰.۴۳	۹۰.۴۲	۹۰.۱۵	۹۰.۳۶
Fa	۹.۲۲	۹.۱۶	۹.۳۰	۹.۴۱	۹.۳۴	۹.۳۳	۹.۴۲	۹.۴۸	۹.۶۸	۹.۴۸
Mg [#]	۰.۹۱	۰.۹۲	۰.۹۲	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱

دنباله جدول ۱

Sample	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
No	Ol 155	Ol 156	Ol 157	Ol 158	Ol 159	Ol 160	Ol 161	Ol 162	Ol 163
SiO ₂	۴۰٫۶۹	۴۰٫۷۰	۴۰٫۶۵	۴۱٫۰۱	۴۱٫۲۴	۴۰٫۹۶	۴۱٫۱۵	۴۱٫۱۱	۴۰٫۶۲
TiO ₂	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۱
Al ₂ O ₃	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Cr ₂ O ₃	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
FeO*	۹٫۲۹	۹٫۰۹	۹٫۴۵	۹٫۱۳	۹٫۴۰	۹٫۲۸	۹٫۴۳	۹٫۲۵	۹٫۲۷
MnO	۰٫۱۹	۰٫۱۴	۰٫۱۴	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۲۰	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۴
MgO	۴۹٫۶۸	۴۹٫۵۸	۴۹٫۵۰	۵۰٫۰۵	۵۰٫۲۸	۵۰٫۰۸	۴۹٫۸۲	۵۰٫۱۶	۴۹٫۵۴
CaO	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Na ₂ O	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰
K ₂ O	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰
Total	۹۹٫۹۰	۹۹٫۵۴	۹۹٫۷۹	۱۰۰٫۳۲	۱۰۱٫۰۵	۱۰۰٫۶۱	۱۰۰٫۵۷	۱۰۰٫۶۸	۹۹٫۵۸
Si	۰٫۹۹	۹٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Al	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Cr	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ⁺²	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۱۹	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۱۹	۰٫۱۸	۰٫۱۸
Fe ⁺³	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Mn	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Mg	۱٫۸۱	۱٫۸۱	۱٫۸۱	۱٫۸۱	۱٫۸۱	۱٫۸۱	۱٫۸۱	۱٫۸۱	۱٫۸۱
Ca	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Te	۰٫۲۰	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۲۱	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۵
Sum	۳٫۱۹۶	۳٫۱۵۰	۳٫۱۴۵	۳٫۰۸۲	۳٫۰۹۲	۳٫۲۰۵	۳٫۱۴۴	۳٫۱۳۳	۳٫۱۴۵
Fo	۹۰٫۳۰	۹۰٫۵۳	۹۰٫۲۰	۹۰٫۶۳	۹۰٫۴۱	۹۰٫۳۶	۹۰٫۲۷	۹۰٫۵۰	۹۰٫۳۷
Fa	۹٫۴۷	۹٫۳۱	۹٫۶۶	۹٫۲۷	۹٫۴۹	۹٫۳۹	۹٫۵۹	۹٫۳۶	۹٫۴۹
Mg#	۰٫۹۱	۰٫۹۱	۰٫۹۱	۰٫۹۱	۰٫۹۱	۰٫۹۱	۰٫۹۰	۰٫۹۱	۰٫۹۱

جدول ۲ نتایج آنالیز ریزپردازشی ارتوپیروکسن و کلینوپیروکسن در هارزبورژیت بر اساس درصد وزنی و فرمول ساختاری بر اساس ۶ اکسیژن.

sample	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
No	Cpx164	Cpx165	Cpx166	Cpx 167	Cpx 168	Cpx 169	Cpx 170	Cpx 171	Cpx 172	Cpx 173
SiO ₂	۵۳٫۷۵	۵۴٫۳۱	۵۶٫۷۹	۵۲٫۷۷	۴۱٫۳۱	۵۴٫۱۳	۵۲٫۸۲	۵۳٫۴۹	۵۲٫۹۶	۵۳٫۴۱
TiO ₂	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۰
Al ₂ O ₃	۱٫۷۱	۱٫۱۵	۱٫۳۵	۲٫۴۳	۰٫۴۵	۱٫۳۶	۲٫۱۵	۱٫۷۱	۲٫۳۵	۲٫۲۷
Cr ₂ O ₃	۰٫۶۵	۰٫۱۷	۰٫۲۶	۱٫۰۳	۰٫۲۴	۰٫۳۰	۰٫۹۲	۰٫۵۴	۰٫۹۷	۰٫۹۳
FeO*	۱٫۸۳	۱٫۷۴	۱٫۸۳	۱٫۹۱	۵٫۷۸	۱٫۹۱	۱٫۷۴	۱٫۷۲	۱٫۸۸	۱٫۷۷
MnO	۰٫۰۶	۰٫۰۸	۰٫۰۵	۰٫۱۰	۰٫۱۴	۰٫۰۹	۰٫۰۸	۰٫۱۰	۰٫۰۵	۰٫۰۷
MgO	۱۷٫۲۶	۱۷٫۷۷	۱۷٫۲۷	۱۶٫۶۸	۳۴٫۲۴	۱۷٫۳۵	۱۷٫۱۶	۱۷٫۳۰	۱۷٫۰۶	۱۶٫۹۴
CaO	۲۴٫۴۹	۲۴٫۴۲	۲۴٫۰۱	۲۴٫۶۴	۰٫۷۰	۲۴٫۳۸	۲۴٫۲۹	۲۵٫۱۲	۲۴٫۹۱	۲۴٫۷۷
Na ₂ O	۰٫۰۶	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۰٫۰۰	۰٫۰۸	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۰٫۰۸
K ₂ O	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۳
Total	۹۹٫۸۲	۹۹٫۶۷	۱۰۱٫۶۰	۹۹٫۶۲	۸۹٫۶۹	۹۹٫۹۰	۹۹٫۲۲	۱۰۰٫۰۷	۱۰۰٫۲۹	۱۰۰٫۲۷
Si	۱٫۹۵۵	۱٫۹۷۴	۲٫۰۳۴	۱٫۹۲۷	۱٫۶۷۶	۱٫۹۶۴	۱٫۹۳۳	۱٫۹۴۱	۲٫۰۱۹	۱٫۹۳۷
Ti	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰
Al	۰٫۰۷۳	۰٫۰۴۹	۰٫۰۵۷	۰٫۱۰۵	۰٫۰۲۲	۰٫۰۵۸	۰٫۰۹۳	۰٫۰۷۳	۰٫۱۰۰	۰٫۰۹۷
Cr	۰٫۰۱۹	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۷	۰٫۰۳۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۲۷	۰٫۰۱۵	۰٫۰۲۸	۰٫۰۲۷
Fe ⁺³	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۵	۰٫۶۲۴	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۸	۰٫۰۳۰	۰٫۰۳۵	۰٫۰۰۸
Fe ⁺²	۰٫۰۵۵	۰٫۰۵۳	۰٫۰۵۵	۰٫۰۴۳	۰٫۴۲۸	۰٫۰۴۸	۰٫۰۳۵	۰٫۰۲۲	۰٫۰۲۲	۰٫۰۴۵
Mn	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲
Mg	۰٫۹۳۶	۰٫۹۶۳	۰٫۹۲۲	۰٫۹۰۸	۲٫۰۷۰	۰٫۹۵۵	۰٫۹۳۶	۰٫۹۶۳	۰٫۹۲۲	۰٫۹۱۶
Ca	۰٫۹۵۴	۰٫۹۵۱	۰٫۹۲۱	۰٫۹۶۴	۰٫۰۳۰	۰٫۹۴۸	۰٫۹۵۲	۰٫۹۷۶	۰٫۹۶۷	۰٫۹۶۲
Na	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۶
Sum	۲٫۰۴۵	۲٫۰۲۶	۱٫۹۶۶	۲٫۰۷۳	۲٫۲۲۴	۲٫۰۳۶	۲٫۰۶۷	۲٫۰۵۹	۲٫۰۸۱	۲٫۰۶۳
Mg#	۰٫۹۴	۰٫۹۵	۰٫۹۴	۰٫۹۵	۰٫۹۶	۰٫۹۵	۰٫۹۶	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۵
Wo	۴۹٫۰۴	۴۸٫۳۵	۴۸٫۵۴	۴۹٫۹۴	۱٫۳۲	۴۸٫۳۵	۴۹٫۰۵	۴۹٫۷۱	۴۹٫۷۱	۴۹٫۸۲
En	۴۸٫۰۹	۴۸٫۹۶	۴۸٫۵۸	۴۷٫۰۴	۹۰٫۱۴	۴۸٫۷۰	۴۸٫۲۱	۴۷٫۶۳	۴۷٫۳۷	۴۷٫۴۰
Fs	۲٫۸۶	۲٫۶۹	۲٫۸۹	۳٫۰۲	۸٫۵۴	۲٫۰۶	۲٫۷۴	۲٫۶۶	۲٫۹۳	۲٫۷۸

دنباله‌ی جدول ۲

sample	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
No	Cpx 174	Cpx 175	Opx 176	Opx 177	Opx 178	Opx 179	Opx 180	Opx 181	Opx 182	Opx 183
SiO ₂	۵۲,۸۲	۵۳,۴۹	۵۵,۵۸	۵۵,۹۶	۵۲,۷۶	۵۵,۷۱	۵۵,۵۶	۵۵,۴۳	۵۶,۰۱	۵۶,۱۳
TiO ₂	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۸	۰,۰۴	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۷	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱
Al ₂ O ₃	۲,۱۵	۱,۷۱	۲,۶۷	۲,۵۱	۲,۱۹	۲,۴۶	۲,۷۴	۲,۶۶	۲,۷۲	۲,۴۰
Cr ₂ O ₃	۰,۹۲	۰,۵۴	۰,۸۷	۰,۷۹	۰,۶۵	۰,۷۴	۰,۷۷	۰,۸۸	۰,۷۰	۰,۶۸
FeO*	۱,۷۴	۱,۷۲	۵,۹۲	۶,۱۳	۶,۲۶	۶,۰۰	۶,۲۱	۵,۷۱	۶,۰۴	۶,۰۲
MnO	۰,۰۸	۰,۱۰	۰,۱۷	۰,۱۵	۰,۱۳	۰,۱۶	۰,۱۵	۰,۱۴	۰,۱۴	۰,۱۲
MgO	۱۷,۱۶	۱۷,۳۰	۳۳,۶۳	۳۳,۶۵	۳۵,۳۵	۳۳,۰۹	۳۳,۷۵	۳۳,۳۳	۳۳,۶۶	۳۳,۳۱
CaO	۲۴,۲۹	۲۵,۱۲	۰,۴۱	۱,۰۱	۰,۳۸	۱,۵۸	۰,۳۱	۲,۶۹	۱,۲۵	۱,۱۶
Na ₂ O	۰,۰۵	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰
K ₂ O	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۰
Total	۹۹,۲۲	۱۰۰,۰۷	۹۹,۳۳	۱۰۰,۲۷	۹۷,۶۳	۹۹,۷۸	۹۹,۵۸	۹۹,۸۵	۱۰۰,۵۴	۹۹,۸۳
Si	۱,۹۳۳۱,۱۱۹	۱,۹۴۱	۱,۹۳۱	۱,۹۳۸	۱,۸۹۸	۱,۹۳۱	۱,۹۳۵	۱,۹۲۴	۱,۹۲۴	۱,۹۴۵
Ti	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۰,۰۰
Al	۰,۰۹۳	۰,۰۷۳	۰,۱۰۹	۰,۱۰۲	۰,۰۹۳	۰,۱۰۱	۰,۱۱۲	۰,۱۰۹	۰,۱۱۰	۰,۰۹۸
Cr	۰,۰۲۷	۰,۰۱۵	۰,۰۲۴	۰,۰۲۲	۰,۰۱۸	۰,۰۲۰	۰,۰۲۱	۰,۰۲۴	۰,۰۱۹	۰,۰۱۹
Fe ^{۳+}	۰,۰۱۸	۰,۰۳۰	۰,۰۰۱	۰,۰۲۰	۰,۰۹۵	۰,۰۱۶	۰,۰۱۴	۰,۰۲۰	۰,۰۲۳	۰,۰۰
Fe ^{۲+}	۰,۰۳۵	۰,۰۲۲	۰,۱۷۱	۰,۱۵۶	۰,۰۹۳	۰,۱۵۸	۰,۱۶۶	۰,۱۶۶	۰,۱۵۰	۰,۱۷۴
Mn	۰,۰۰۲	۰,۰۰۳	۰,۰۰۵	۰,۰۰۴	۰,۰۰۴	۰,۰۰۵	۰,۰۰۴	۰,۰۰۴	۰,۰۰۴	۰,۰۰۳
Mg	۰,۹۳۶	۰,۹۶۳	۱,۷۴۲	۱,۷۲۸	۱,۷۸۳	۱,۷۱۰	۱,۷۴۳	۱,۶۷۳	۱,۷۲۴	۱,۷۲۱
Ca	۰,۹۵۲	۰,۹۷۶	۰,۰۱۵	۰,۰۳۷	۰,۰۱۵	۰,۰۵۹	۰,۰۱۲	۰,۱۰۰	۰,۰۴۶	۰,۰۴۳
Na	۰,۰۰۴	۰,۰۰۲	۰,۰۰۰	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰	۰,۰۰
Sum	۲,۸۸۱	۲,۰۶۶	۲,۰۶۹	۲,۰۷۲	۲,۱۰۲	۲,۰۶۹	۲,۰۷۵	۲,۰۷۶	۲,۰۷۶	۲,۰۰۵
Mg [#]	۰,۹۶	۰,۹۸	۰,۹۱	۰,۹۲	۰,۹۵	۰,۹۲	۰,۹۱	۰,۹۲	۰,۹۲	۰,۹۱
Wo	۴۹,۰۵	۴۹,۷۱	۰,۷۹	۱,۹۲	۰,۷۴	۳,۰۲	۰,۵۹	۵,۱۶	۲,۳۷	۲,۲۲
En	۴۸,۲۱	۴۷,۶۳	۹,۰۲۹	۸۸,۹۹	۸۹,۷۸	۸۸,۰۳	۹,۰۱۰	۸۶,۲۹	۸۸,۷۰	۸۸,۷۸
Fs	۲,۷۴	۲,۶۶	۸,۹۲	۹,۰۹	۹,۴۸	۸,۹۵	۹,۳۰	۸,۵۵	۸,۹۳	۹,۰۰

دنباله‌ی جدول ۲

sample	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
No	Opx 186	Opx 187	Opx 188	Opx 189	Opx 191	Opx 192	Opx 193
SiO ₂	۵۶,۳۲	۵۷,۲۶	۵۷,۴۱	۵۶,۳۴	۵۶,۳۸	۵۶,۳۷	۵۶,۰۶
TiO ₂	۰,۰۰	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰
Al ₂ O ₃	۲,۳۹	۲,۸۴	۱,۶۹	۲,۷۵	۲,۳۲	۱,۷۰	۲,۷۸
Cr ₂ O ₃	۰,۷۱	۰,۷۵	۰,۳۰	۰,۷۴	۰,۶۱	۰,۳۱	۰,۷۹
FeO*	۶,۲۷	۹,۱۰	۶,۳۸	۶,۲۰	۵,۶۳	۹,۱۴	۹,۲۸
MnO	۰,۱۴	۰,۱۷	۰,۱۴	۰,۱۴	۰,۱۶	۰,۱۷	۰,۱۸
MgO	۳۲,۴۲	۳۳,۴۱	۳۴,۶۶	۳۴,۰۸	۳۴,۳۰	۳۲,۷۴	۳۳,۷۵
CaO	۲,۵۲	۰,۶۵	۰,۲۳	۰,۳۴	۰,۵۱	۲,۶۶	۰,۳۶
Na ₂ O	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱
K ₂ O	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰
Total	۱۰۰,۰۲	۱۰۱,۲۴	۱۰۰,۶۹	۱۰۰,۸۱	۱۰۰,۵۹	۹۹,۷۱	۱۰۰,۲۲
Si	۱,۹۴	۱,۹۵	۱,۹۶	۱,۹۲	۱,۹۳	۱,۹۵	۱,۹۳
Ti	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Al	۰,۰۹	۰,۱۱	۰,۰۶	۰,۱۱	۰,۰۹	۰,۰۷	۰,۱۱
Cr	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۰۸	۰,۰۲	۰,۰۱۷	۰,۰۰۹	۰,۰۲
Fe ^{۳+}	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱۲	۰,۰۲۴	۰,۰۰۷	۰,۰۰۳
Fe ^{۲+}	۰,۱۵	۰,۱۵	۱,۰۰۹	۰,۱۷	۰,۱۶	۱,۱۰	۱,۱۰
Mn	۰,۰۰۴	۰,۰۰۵	۰,۰۰۴	۰,۰۰۴	۰,۰۰۵	۰,۰۰۵	۰,۰۰۵
Mg	۱,۶۷	۱,۷۰	۱,۷۶	۱,۷۳	۱,۷۵	۱,۶۹	۱,۷۳
Ca	۰,۰۹	۰,۰۲	۰,۰۰۸	۰,۰۱۲	۰,۰۱۹	۰,۰۹۹	۰,۰۱۳
Na	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰۱
Sum	۲,۰۵۲	۲,۰۴۲	۲,۰۳۶	۲,۰۷۱	۲,۰۶۷	۲,۰۴۳	۲,۰۶۸
Mg [#]	۹۱,۱۲	۹۰,۶۸	۹۰,۸۸	۹۱,۰۶	۹۱,۸۴	۹۱,۴۳	۹۰,۶۸
Wo	۴,۸۴	۱,۲۵	۰,۴۳	۰,۶۴	۰,۹۶	۵,۰۵	۰,۹۶
En	۶۹,۷۱	۸۹,۵۵	۹۰,۴۹	۸۹,۹۱	۸۹,۸۳	۸۶,۴۶	۸۹,۹۲
Fs	۸,۴۵	۹,۲۰	۹,۰۸	۹,۴۴	۹,۲۱	۸,۴۹	۹,۳۹

جدول ۳ نتایج تجزیه‌ی ریزپردازشی الکترونی اسپینل در هارژبورژیت بر اساس درصد وزنی و فرمول ساختاری بر اساس ۴ اکسیژن.

sample	Spl 12	Spl 13	Spl 14	Spl 15	Spl 16	Spl 17	Spl 18	Spl 19	Spl 20	Spl 21
SiO ₂	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۰۰
TiO ₂	۰٫۰۲	۰٫۰۶	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۴
Al ₂ O ₃	۳۲٫۵۵	۳۰٫۷۰	۳۴٫۱۷	۳۶٫۶۵	۳۷٫۴۳	۳۵٫۰۴	۳۷٫۹۴	۳۱٫۳۶	۳۱٫۱۵	۳۱٫۹۲
Cr ₂ O ₃	۳۵٫۰۶	۳۶٫۷۷	۳۲٫۹۶	۳۰٫۵۰	۲۸٫۴۹	۳۲٫۳۵	۲۹٫۰۲	۳۵٫۴۲	۳۶٫۱۲	۳۵٫۶۰
FeO*	۱۸٫۰۸	۱۹٫۱۹	۱۸٫۵۱	۱۸٫۱۷	۱۸٫۷۸	۱۷٫۹۰	۱۷٫۰۴	۱۹٫۰۸	۱۸٫۶۹	۱۸٫۵۶
MnO	۰٫۲۴	۰٫۲۷	۰٫۲۲	۰٫۲۰	۰٫۲۷	۰٫۲۱	۰٫۲۱	۰٫۲۸	۰٫۲۳	۰٫۲۴
MgO	۱۴٫۴۳	۱۳٫۴۴	۱۴٫۳۶	۱۴٫۶۱	۱۴٫۳۳	۱۴٫۳۷	۱۵٫۳۰	۱۳٫۷۰	۱۳٫۸۰	۱۴٫۰۴
CaO	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۸	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰
Total	۱۰۰٫۷۸	۱۰۰٫۰۸	۱۰۲٫۱۴	۱۰۱٫۴۶	۹۹٫۸۳	۹۹٫۹۱	۹۹٫۵۸	۹۹٫۹۲	۱۰۰٫۰۷	۱۰۰٫۴۰
Si	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱
Ti	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱
Al	۱٫۱۱۸	۱٫۰۶۸	۱٫۱۶۸	۱٫۲۴۰	۱٫۲۶۶	۱٫۱۹۸	۱٫۲۷۸	۱٫۰۹۱	۱٫۰۸۳	۱٫۱۰۲
Cr	۰٫۸۰۸	۰٫۸۵۸	۰٫۷۵۶	۰٫۶۹۲	۰٫۶۹۶	۰٫۷۴۲	۰٫۶۵۶	۰٫۸۲۷	۰٫۸۴۲	۰٫۸۲۴
Fe ⁺³	۰٫۰۷۳	۰٫۰۷۰	۰٫۰۷۴	۰٫۰۶۵	۰٫۰۸۶	۰٫۰۶۰	۰٫۰۶۳	۰٫۰۷۹	۰٫۰۷۱	۰٫۰۷۲
Fe ⁺²	۰٫۳۶۸	۰٫۴۰۳	۰٫۳۷۵	۰٫۳۷۱	۰٫۳۶۵	۰٫۳۷۴	۰٫۳۴۴	۰٫۳۹۲	۰٫۳۹۰	۰٫۳۸۲
Mn	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶
Mg	۰٫۶۲۷	۰٫۵۹۱	۰٫۶۲۱	۰٫۶۲۵	۰٫۶۲۰	۰٫۶۲۱	۰٫۶۵۲	۰٫۶۰۳	۰٫۶۰۷	۰٫۶۱۳
Sum	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
Mg [#]	۶۳٫۰۴	۵۹٫۴۵	۶۲٫۳۵	۶۲٫۷۴	۶۳٫۳۵	۶۲٫۴۳	۶۵٫۴۴	۶۰٫۶۲	۶۰٫۹۰	۶۱٫۶۰
Cr [#]	۴۱٫۹۵	۴۴٫۵۵	۳۹٫۲۹	۳۵٫۸۳	۳۳٫۸۰	۳۸٫۲۵	۳۳٫۹۱	۴۳٫۱۱	۴۳٫۷۵	۴۲٫۸۰
Fe [#]	۱۶٫۵	۱۴٫۸	۱۶٫۵	۱۴٫۹	۱۹٫۰۶	۱۳٫۸	۱۵٫۴۷	۱۶٫۷۷	۱۷٫۱۴	۱۵٫۸۶

دنباله‌ی جدول ۳

sample	Spl 22	Spl 23	Spl 28	Spl 29	Spl 24	Spl 25	Spl 26	Spl 27	Spl 28	Spl 29
SiO ₂	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۲
TiO ₂	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۰
Al ₂ O ₃	۲۳٫۳۴	۳۰٫۳۶	۳۲٫۷۷	۳۳٫۲۸	۳۴٫۳۵	۳۳٫۳۹	۳۳٫۰۴	۳۱٫۲۴	۳۲٫۷۷	۳۳٫۲۸
Cr ₂ O ₃	۲۳٫۶۳	۳۷٫۲۷	۳۴٫۲۰	۳۳٫۹۹	۳۳٫۱۳	۳۴٫۵۹	۳۴٫۶۶	۳۴٫۹۱	۳۴٫۲۰	۳۳٫۹۹
FeO*	۱۸٫۳۵	۱۹٫۰۰	۱۸٫۹۷	۱۸٫۲۲	۱۸٫۳۵	۱۸٫۶۳	۱۸٫۴۸	۱۹٫۴۳	۱۸٫۹۷	۱۸٫۲۲
MnO	۰٫۲۲	۰٫۲۳	۰٫۲۶	۰٫۲۷	۰٫۲۳	۰٫۲۵	۰٫۲۶	۰٫۲۴	۰٫۲۶	۰٫۲۷
MgO	۱۴٫۱۲	۱۳٫۶۲	۱۴٫۱۸	۱۴٫۶۰	۱۴٫۳۷	۱۴٫۱۷	۱۴٫۵۳	۱۳٫۹۸	۱۴٫۱۸	۱۴٫۶۰
CaO	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۴
Total	۹۹٫۷۰	۱۰۰٫۵۴	۱۰۰٫۴۲	۱۰۰٫۴۲	۱۰۰٫۴۹	۱۰۱٫۱۰	۱۰۱٫۰۶	۹۹٫۸۵	۱۰۰٫۴۳	۱۰۰٫۴۲
Si	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱
Ti	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Al	۱٫۱۵۰	۱٫۰۵۶	۱٫۱۲۶	۱٫۱۳۹	۱٫۱۷۱	۱٫۱۳۹	۱٫۱۲۶	۱٫۰۸۶	۱٫۱۲۶	۱٫۱۳۹
Cr	۰٫۷۷۸	۰٫۸۶۹	۰٫۷۸۸	۰٫۷۸۰	۰٫۷۵۸	۰٫۷۹۱	۰٫۷۹۲	۰٫۸۱۴	۰٫۷۸۸	۰٫۷۸۰
Fe ⁺³	۰٫۰۷۰	۰٫۰۷۱	۰٫۰۸۴	۰٫۰۸۰	۰٫۰۶۸	۰٫۰۶۶	۰٫۰۷۸	۰٫۰۹۹	۰٫۰۸۴	۰٫۰۸۰
Fe ⁺²	۰٫۳۷۹	۰٫۳۹۶	۰٫۳۷۸	۰٫۳۶۲	۰٫۳۷۶	۰٫۳۸۴	۰٫۳۶۹	۰٫۳۸۰	۰٫۳۷۸	۰٫۳۶۲
Mn	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۷
Mg	۰٫۶۱۶	۰٫۵۹۹	۰٫۶۱۶	۰٫۶۳۲	۰٫۶۲۰	۰٫۶۱۱	۰٫۶۲۶	۰٫۶۱۵	۰٫۶۱۶	۰٫۶۳۲
Sum	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
Mg [#]	۶۱٫۹۰	۶۰٫۱۸	۶۱٫۹۵	۶۳٫۵۷	۶۲٫۲۲	۶۱٫۳۹	۶۲٫۹۳	۶۱٫۸۰	۶۱٫۹۵	۶۳٫۵۷
Cr [#]	۴۰٫۳۶	۴۵٫۱۶	۴۱٫۱۸	۴۰٫۶۶	۳۹٫۲۸	۴۱٫۰۰	۴۱٫۳۱	۴۲٫۸۵	۴۱٫۱۸	۴۰٫۶۶
Fe [#]	۱۵٫۵۹	۱۵٫۲	۱۸٫۱۸	۱۸٫۰۹	۱۵٫۳۱	۱۴٫۶۷	۱۷٫۴۵	۲۰٫۶۷	۱۸٫۱۸	۱۸٫۰۹

دنباله جدول ۳

sample	Spl 31	Spl 32	Spl 33	Spl 34	Spl 35	Spl 37	Spl 38	Spl 39	Spl 40	Spl 41
SiO ₂	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲
TiO ₂	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۱
Al ₂ O ₃	۳۱٫۱۳	۳۲٫۱۲	۳۶٫۲۱	۳۲٫۹۱	۳۱٫۲۰	۳۱٫۶۲	۳۴٫۱۲	۳۴٫۲۲	۳۴٫۶۳	۳۱٫۳۱
Cr ₂ O ₃	۳۶٫۲۹	۳۵٫۰۸	۳۱٫۴۸	۳۴٫۳۵	۳۶٫۱۷	۳۵٫۰۲	۳۳٫۱۳	۳۲٫۸۳	۳۱٫۷۴	۳۵٫۶۳
FeO*	۱۹٫۶۸	۱۸٫۸۶	۱۷٫۳۶	۱۹٫۰۴	۱۹٫۳۱	۱۹٫۶۸	۱۸٫۲۹	۱۸٫۷۷	۱۸٫۶۴	۱۹٫۰۶
MnO	۰٫۳۰	۰٫۲۷	۰٫۲۶	۰٫۲۶	۰٫۲۶	۰٫۲۷	۰٫۲۴	۰٫۲۷	۰٫۲۷	۰٫۲۸
MgO	۱۳٫۹۵	۱۴٫۱۱	۱۵٫۰۱	۱۴٫۳۴	۱۳٫۸۶	۱۳٫۸۰	۱۴٫۱۴	۱۴٫۲۵	۱۴٫۴۹	۱۳٫۵۷
CaO	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۷	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Total	۱۰۱٫۴۱	۱۰۰٫۴۹	۱۰۰٫۴۸	۱۰۰٫۹۹	۱۰۰٫۸۱	۱۰۰٫۴۵	۹۹٫۹۶	۱۰۰٫۴۰	۹۹٫۸۱	۹۹٫۸۹
Si	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱
Ti	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰
Al	۱٫۰۶۹	۱٫۱۰۶	۱٫۲۲۲	۱٫۱۲۴	۱٫۰۷۷	۱٫۰۹۳	۱٫۱۷۱	۱٫۱۶۹	۱٫۱۸۵	۱٫۰۹۱
Cr	۰٫۸۳۶	۰٫۸۱۱	۰٫۷۱۳	۰٫۷۸۷	۰٫۸۳۸	۰٫۸۱۲	۰٫۷۶۳	۰٫۷۵۲	۰٫۷۲۸	۰٫۸۳۳
Fe ⁺³	۰٫۰۹۱	۰٫۰۸۱	۰٫۰۶۱	۰٫۰۸۶	۰٫۰۸۵	۰٫۰۹۱	۰٫۰۶۵	۰٫۰۷۶	۰٫۰۸۵	۰٫۰۷۵
Fe ⁺²	۰٫۳۸۸	۰٫۳۸۰	۰٫۳۵۵	۰٫۳۷۵	۰٫۳۸۸	۰٫۳۹۱	۰٫۳۸۱	۰٫۳۷۹	۰٫۳۶۷	۰٫۳۹۶
Mn	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷
Mg	۰٫۶۰۶	۰٫۶۱۵	۰٫۶۴۱	۰٫۶۲۰	۰٫۶۰۵	۰٫۶۰۳	۰٫۶۱۴	۰٫۶۱۶	۰٫۶۲۷	۰٫۵۹۸
Sum	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
Mg [#]	۶۰٫۹۶	۶۱٫۸۲	۶۴٫۳۴	۶۲٫۲۹	۶۰٫۹۱	۶۰٫۶۶	۶۱٫۷۲	۶۱٫۹۳	۶۲٫۰۶	۶۰٫۱۶
Cr [#]	۴۳٫۸۸	۴۲٫۲۹	۳۶٫۸۴	۴۱٫۱۸	۴۳٫۳۷	۴۲٫۶۳	۳۹٫۴۴	۳۹٫۱۶	۳۸٫۰۸	۴۳٫۲۹
Fe ^{3#}	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴

$$\text{Mg}^{\#} = \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{+2})$$

$$\text{Fe}^{\#} = \text{Fe}^{+3} / (\text{Fe}^{+3} + \text{Fe}^{+2})$$

$$\text{Cr}^{\#} = \text{Cr} / (\text{Cr} + \text{Al})$$

زمین شناسی و سنگ‌نگاری

منطقه‌ی مورد بررسی در شمال غربی بیرجند قرار گرفته و بخشی از مجموعه افیولیت ملائزی زون جوش خورده‌ی سیستان است که پريدوتيت (بیشتر هارزبورژیت)، گابرو لایه‌ای و گدازه‌های بالشی، واحدهای این مجموعه را می‌سازند. پريدوتيت‌ها در شمال و شرق روستای فریزنوک و جنوب و جنوب غربی روستای ریز آب رخمنون دارند (شکل ۱). حضور بلورهای درشت برونزیت از ویژگی‌های چشمگیر پريدوتيت‌های این منطقه است. این سنگ‌ها تحت تاثیر تنش‌ها و حرکات زمین‌ساختی [۱۲] و گاه پیدایش شکستگی‌های کششی ناشی از فرآیند سرپانتینی شدن، شدیداً شکسته و خرد شده‌اند. زون‌های گسلی بستری مناسب برای دگرسانی‌هایی مانند سرپانتینی و لیستونیتی شدن [۱۳، ۱۴] را فراهم کرده است. لیستونیت‌ها در منطقه به صورت تیغه‌هایی با ریخت‌شناسی برخاسته در درون پريدوتيت‌های سرپانتینی شده مشاهده می‌شوند. واحد گابرویی در ۵ کیلومتری غرب فریزنوک و واحد گدازه‌ای وابسته به دنباله‌ی افیولیتی در چندین محل از جمله

در نواحی جنوب و جنوب شرقی روستای فریزنوک رخمنون دارند (شکل ۱). گدازه‌ها اغلب دارای ساخت بالشی بوده و با میان لایه‌هایی از شیل‌های ارغوانی مشاهده می‌شوند. نهشته‌های فلیشی کرتاسه و پالئوژن در بخش‌های جنوبی، مرکزی و شمالی منطقه‌ی مورد بررسی مشاهده می‌شوند. رخمنون‌های کوچکی از گرانیت، گرانودیوریت، دیوریت و کوارتز دیوریت پورفیری به درون مجموعه فلیشی نفوذ کرده‌اند که به اتوسن [۱] وابسته‌اند.

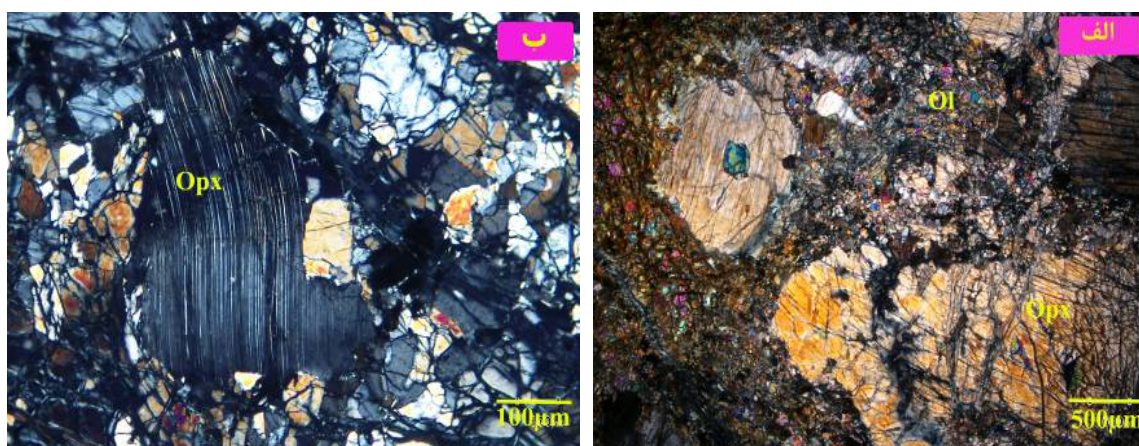
هارزبورژیت: بافت‌های غالب در این واحد سنگی، گرانوبلاستیک، پورفیروکلاستیک و مشبک است. حضور بافت پورفیروکلاستیک (شکل ۲-الف) حاکی از تاثیر دگرشکلی با دمای پایین بر این سنگ‌هاست. آثار دگرشکلی پلاستیک که در دمای بالا رخ می‌دهد [۱۵، ۱۶]، از جمله نوارشکن (Kink band) و در پیروکسن‌ها (شکل ۲-ب) مشاهده می‌گردد. الیوین، ارتوپروکسن و کلینوپروکسن کانی‌های اصلی و کروم اسپینل کانی فرعی این واحد را می‌سازد. الیوین‌های نسبتاً تازه به صورت دانه‌های ریزی (کوچکتر از ۰/۵ میلی‌متر) در اطراف

غنی از پیروکسن و نوارهای روشن غنی از پلاژیوکلاز هستند (شکل ۳-الف). پلاژیوکلاز در این سنگها معمولاً شکل دار تا نیمه شکل دار با ردی پلی سنتتیک دیده می شود. گابروها دارای پلاژیوکلازهای با ردی کوتاه شونده هستند که نشانی از دگرشکلی پلاستیک است [۱۷] (شکل ۳-ب). پلاژیوکلازها به مقدار کم به کانی های رسی دگرسان شده اند. کلینوپیروکسن به عنوان تنها کانی فرومنیزین این واحد سنگی عموماً بی شکل تا نیمه شکل دارند.

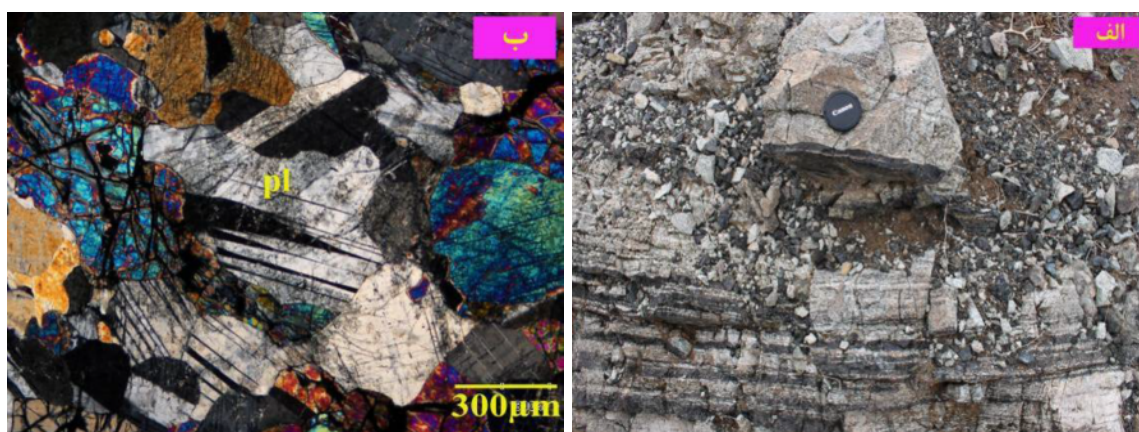
اسپیلیت: پلاژیوکلاز و پیروکسن کانی های اصلی و کلریت، اپیدوت، کربنات و اکسید آهن، کانی های ثانویه این واحد سنگی هستند. بافت غالب در این سنگها پورفیری، اسکلتی و دم چلچله ای [۱۸] است.

ارتوپیروکسنها مشاهده می شوند (شکل ۲-الف). برخی از دانه های الیوین شدیداً سرپانتینی شده اند. ارتوپیروکسنها با ابعاد ۰/۵ تا ۳ میلی متر، درشت ترین اجزای این سنگها را می سازند. کلینوپیروکسنها با ابعاد ۰/۵ تا ۱ میلی متر و همچون ارتوپیروکسنها خاموشی موجی نشان می دهند. اسپینل به صورت شکل دار تا نیمه شکل دار در اطراف ارتوپیروکسنها و الیوینها وجود دارد. این کانی در نور طبیعی به رنگ قهوه ای روشن دیده می شود، فاقد خاموشی موجی و آثاری از دگرشکلی پلاستیک است و دارای حاشیه سیاه اند که می تواند نشان از مگنتیتی شدن آنها باشد. هیچ ادخال از الیوین و اسپینل در پیروکسنها مشاهده نشدند.

واحد گابرویی: این واحد در صحرا و نمونه های ماکروسکوپی لایه بندی تکراری تیره و روشن را نشان می دهد. نوارهای تیره



شکل ۲ الف بافت پورفیروکلاستیکی در هارزبورژیت های منطقه نشان دهنده ی اعمال دگرشکلی در دمای پایین است (XPL). ب: خمیدگی رخ های ارتوپیروکسن در هارزبورژیت که نشان دهنده ی اعمال دگرشکلی پلاستیک است (XPL).



شکل ۳ الف: تناوب نوارهای تیره (غنی از پیروکسن) و روشن (غنی از پلاژیوکلاز) در گابروهای منطقه ی مورد بررسی. ب: دگر شکلی پلاستیک در پلاژیوکلازهای گابروها به صورت ماکل کوتاه شونده دیده می شود (XPL).

شیمی کانی‌ها

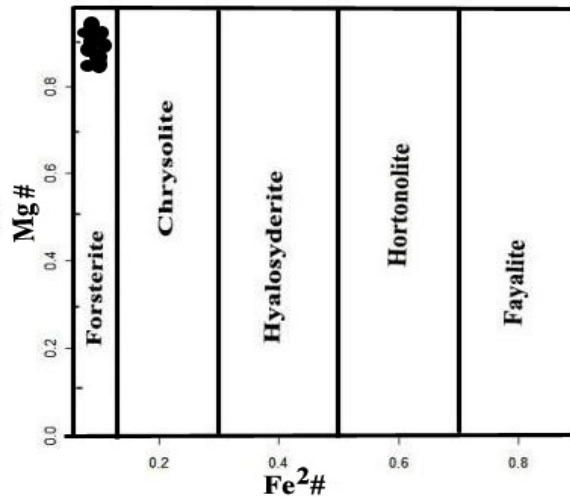
برای شناخت ترکیب شیمیایی، نامگذاری، تعیین دما و فشار تبلور تعادلی مجموعه‌های کانیایی در هارزبورژیت، از تجزیه‌ی نقطه‌ای کانی‌های الیوین، پیروکسن‌ها و اسپینل استفاده شده است.

الیوین: ترکیب الیوین‌های موجود در هارزبورژیت‌ها در گستره‌ی $FO_{90.15}-FO_{90.75}$ و دارای ترکیب متوسط $FO_{90.52}$ هستند که در گستره‌ی فورستريت [۱۹] قرار می‌گیرند (شکل ۴).

پیروکسن: برای نام‌گذاری پیروکسن‌ها، از روش [۲۰] استفاده شد. در این روش نخست با استفاده از نمودار Q-J انواع پیروکسن‌های سدیک، سدیک-کلسیک و کلسیک از هم جدا

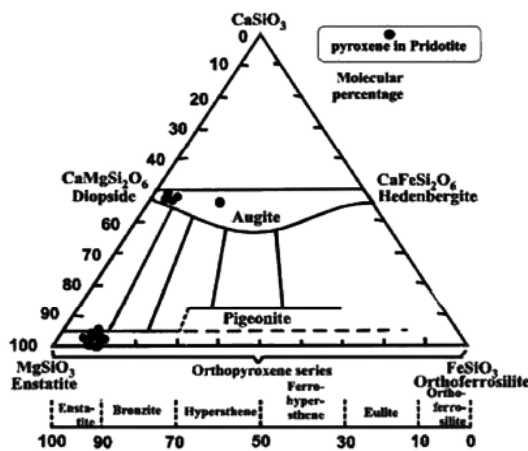
شدند. $(Q = Ca + Mg + Fe^{2+}, J = 2Na)$ پیروکسن‌ها در گستره‌ی پیروکسن‌های کلسیم، آهن و منیزیم‌دار قرار می‌گیرند (شکل ۵-الف). بر اساس نمودار مثلثی ولاستونیت-انستاتیت-فروسیلیت [۲۰]، پیروکسن‌ها از نوع اوژیت دیوپسیدی ($Mg^{\#}$ = 95.8) و انستاتیت ($Mg^{\#} = 91.58$) هستند (شکل ۵-ب).

اسپینل: اسپینل یک کانی معمولی در سنگ‌های آذرین اولترامافیکی مانند دونیت، هارزبورژیت، لرزولیت، ورلیت، پیروکسنیت، ویستريت و تروکتولیت است. اسپینل‌ها (با میانگین عدد کروم ۴۱، عدد آهن ۱۶٫۶ و عدد منیزیم ۶۲) در نمودار $Al-Fe^{+3} + Ti-Cr$ [۲۱]، در گروه اسپینل‌های آلومینیوم-کروم‌دار قرار می‌گیرند (شکل ۶).

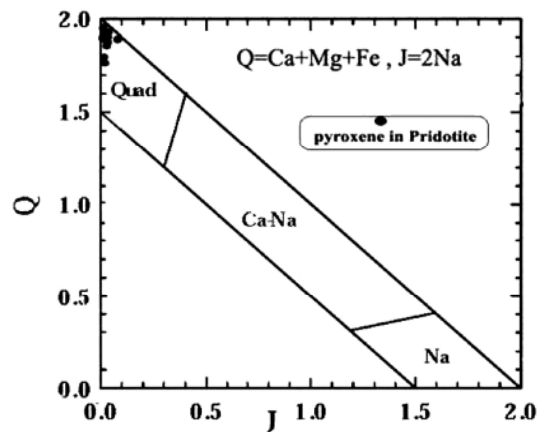


شکل ۴ ترکیب الیوین‌ها در پريدوتيت‌ها [۱۸].

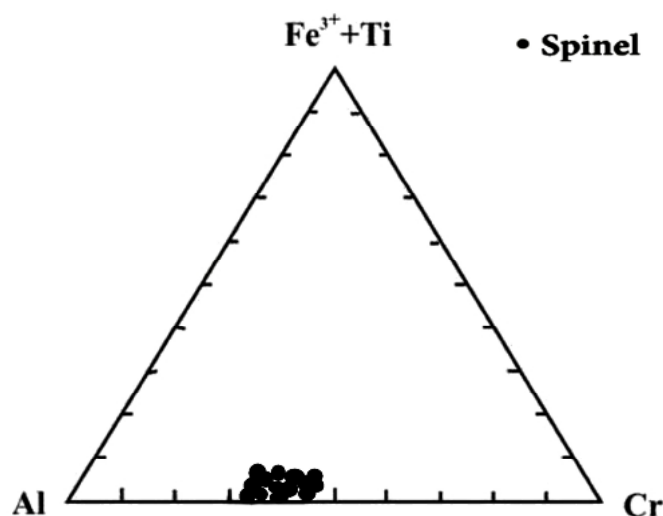
ب



الف



شکل ۵ الف: موقعیت پیروکسن‌های موجود در هارزبورژیت در نمودارهای Q در مقابل J [۱۹] ب: نمودار مثلثی پیروکسن‌ها که نشان‌دهنده‌ی اوژیت دیوپسیدی و انستاتیت در نمونه‌ی هارزبورژیت است [۱۹].



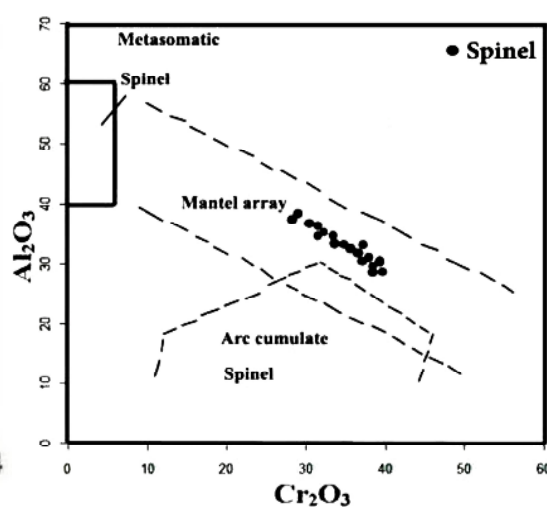
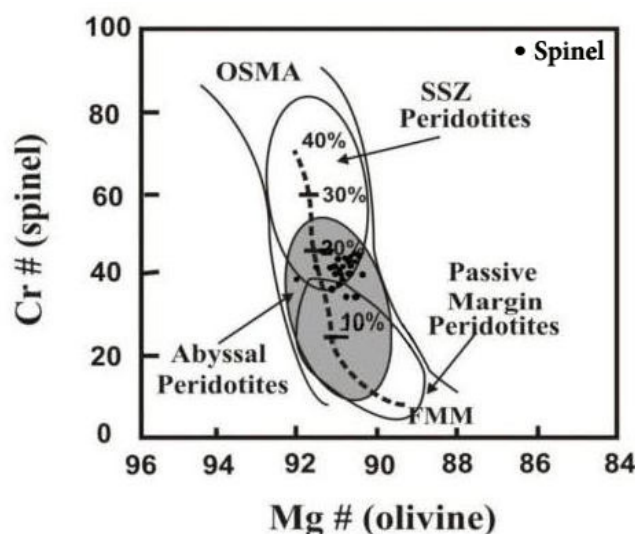
شکل ۶ نمودار مثلثی اسپینل ها که نشان دهنده وجود اسپینل آلومینیوم- کروم دار در نمونه هارزبورژیت است [۲۰].

تعیین خاستگاه پریدوتیت

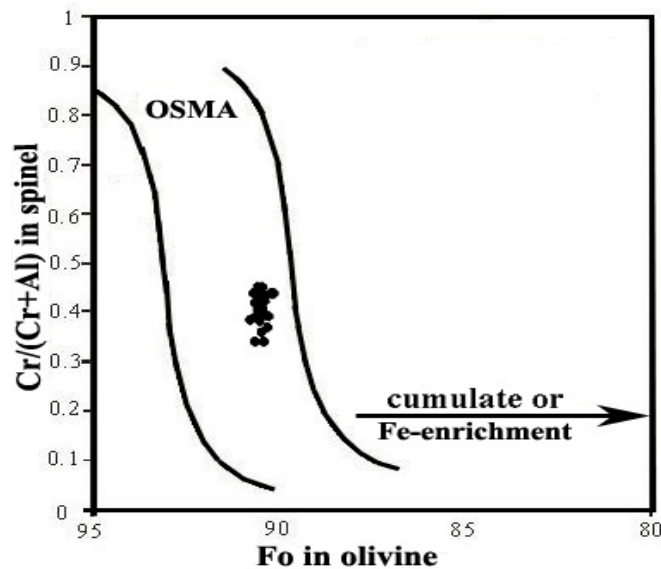
ترکیب شیمیایی و عدد کروم ($Cr^{\#}$) در اسپینل ها به عنوان یک نشانگر در تعیین خاستگاه پریدوتیت ها [۹] استفاده شده است. بررسی مقدار Al_2O_3 در اسپینل ها نسبت به Cr_2O_3 آنها (شکل ۷-الف) نشان می دهد که این پریدوتیت ها در گستره ی پریدوتیت های گوشته ای [۲۲-۲۴] قرار می گیرند. عدد کروم ($Cr^{\#}$) اسپینل در پریدوتیت ها معیار مناسبی است برای تعیین درجه تهی شدگی و درجه ذوب بخشی یک خاستگاه گوشته ای است [۲۵، ۲۲]. نمودار عدد کروم ($Cr^{\#}$) در اسپینل نسبت به

الف

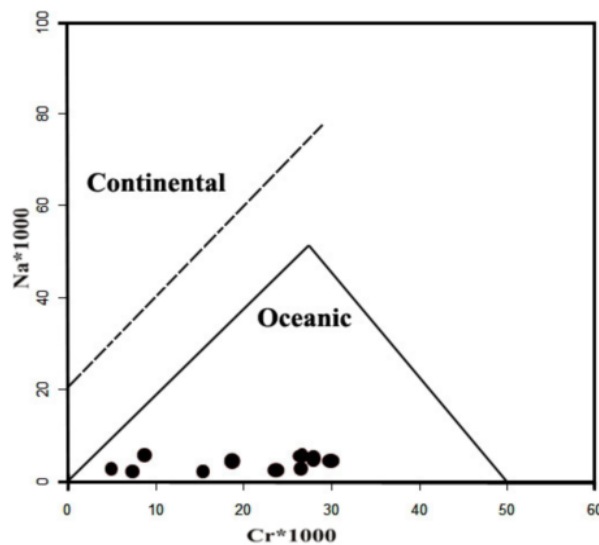
ب



شکل ۷ الف: نمودار Al_2O_3 نسبت به Cr_2O_3 در اسپینل که خاستگاه گوشته ای اسپینل ها را نشان می دهد. [۲۳، ۲۲، ۲۱]. ب- $Cr^{\#}$ اسپینل نسبت به $Mg^{\#}$ الیون های همزیست در پریدوتیت که نشان دهنده ترکیب OSMA و abyssal است. [۲۴].



شکل ۸ مقدار فورستريت اليوين نسبت به $Cr^{\#}$ اسپينل همزيست با آن که گوشته ای بودن پريدوتيت های منطقه مورد بررسی را نشان می دهد. [۲۴].



شکل ۹ مقدار اتمی Na کليوپيروکسن نسبت به Cr آن در پريدوتيت های گوشته‌اي منطقه [۲۶]، پريدوتيت‌های افیوليت منطقه در گستره‌ی افيانوسی قرار می گيرند.

دما- فشارسنجی پريدوتيت‌های گوشته

با استفاده از نتايج حاصل از آناليز نقطه‌اي کانی‌ها، تعيين فشار و دما در زمان تبلور هارزبورژيت با دماسنجی زوج کانی کليوپيروکسن - ارتوپيروکسن [۲۷]، و اليوين - اسپينل، و فشارسنج کليوپيروکسن، محاسبات دما - فشارسنجی با استفاده از نرم افزار PTMAFIC [۱۷] انجام شد. فرمول ارائه شده توسط [۲۷] عبارت است از:

$$T_c = \frac{-10202}{(\ln K) - 4.6} - 7.65 X_{Fe}^{OpX} + 3.88 (X_{Fe}^{OpX})^2 - 273.15$$

$$K = \frac{\alpha Mg_2Si_2O_6^{CPX} / \alpha Mg_2Si_2O_6^{OPX}}{(X_{Mg}^{M2} \cdot X_{Mg}^{M1})_{CPX} / (X_{Mg}^{M2} \cdot X_{Mg}^{M1})_{OPX}}$$

که فعاليت $Mg_2Si_2O_6$ در پيروکسن با استفاده از معادله‌ی:

$$\alpha Mg_2Si_2O_6 = X_{Mg}^{M2} \cdot X_{Mg}^{M1}$$

تأثير Fe^{2+} در پيروکسن‌های معمولی با در نظر گرفتن عبارت X_{Fe}^{OPX} و عبارت:

$$X_{Fe}^{OPX} = (Fe^{2+} / Fe^{2+} + Mg)^{OPX}$$

دماهای بدست آمده در روش [۳۱]، دمای ۷۵۰ درجه‌ی سانتیگراد در فشار ۲۵ کیلوبار، ۷۴۲ درجه‌ی سانتیگراد در فشار ۱۵ کیلوبار و دمای ۷۱۰ درجه‌ی سانتیگراد در فشار ۱۰ کیلوبار است. نتایج دماسنجی بدست آمده، و اختلاف دمایی نسبتاً زیادی را بین دمای تبلور بدست آمده از دماسنج دو پیروکسن (میانگین دمای 100 ± 1016 درجه سانتیگراد) و از دماسنج الیوین- اسپینل (میانگین دمای تعادل ۷۵۰ درجه‌ی سانتیگراد) را در فشار ۲۵ کیلوبار برای پریدوتیت نشان داد. این اختلاف دما مبین این است که کانی‌های الیوین و اسپینل موجود در این پریدوتیت‌ها در دمای پایین‌تری نسبت به پیروکسن‌های همزیست خود به تعادل رسیده‌اند. عدم وجود آثار نوار شکن و خاموشی موجی در الیوین و اسپینل، فراوانی چشمگیر الیوین در اطراف ارتوپيروكسن و عدم وجود ادخال‌های الیوین و اسپینل در پیروكسن‌ها، شکل‌گیری این کانی‌ها را طی روند ترتیب تبلور عادی رد و نوظهور بودن آنها را تایید می‌کند. چنین شرایطی می‌تواند در مناطق بالای زون فرورانشی (Supra subduction zone) که پریدوتیت‌ها تحت تاثیر مواد فرار آزاد شده از ورق اقیانوسی فرورونده قرار داشته‌اند، نشان دهد. بر اساس شکل ۹ پریدوتیت‌های منطقه در گستره‌ی محیط اقیانوسی قرار گرفته‌اند و در این شرایط اولین کانی ذوب شده، کلینوپيروكسن است که باعث ایجاد یک گدازه‌ی فقیر از سیلیس و تبدیل لرزولیت به هارزبورژیت می‌شود. پس از ذوب کلینوپيروكسن و برهم‌کنش گدازه‌ی تولید شده با ارتوپيروكسن‌ها، شرایط ذوب نامتجانس ارتوپيروكسن و ایجاد الیوین‌های نوظهور فراهم می‌شود [۳۲].

برداشت

بافت‌های غالب در هارزبورژیت‌های منطقه شمال غرب بیرجند دانه‌ای، پورفیروکلاستیک و مشبک است. حضور بافت پورفیروکلاستیک حاکی از تحمل دگرشکلی در دمای پایین و آثار دگرشکلی پلاستیک از جمله نوارشکن (Kink band) و خاموشی موجی در پیروكسن‌ها بیانگر رخداد دگرشکلی در دمای در این سنگ‌هاست. الیوین‌های نسبتاً تازه به صورت ریزدانه و اسپینل‌ها به صورت کرمی شکل در اطراف ارتوپيروكسن‌ها و الیوین‌ها مشاهده، شده و به عنوان کانی‌های نوظهور معرفی می‌شوند. الیوین‌ها می‌توانند حاصل از ذوب

بدست می‌آید. این معادله میانگین دمای تعادل کانی‌های ارتوپيروكسن- کلینوپيروكسن همزیست [۲۷] را 100 ± 1016 درجه‌ی سانتیگراد نشان می‌دهد. از محتوای Na، Cr و K موجود در پیروكسن‌ها برای تعیین فشار حاکم بر پریدوتیت‌های گوشته‌ی منطقه از معادله‌ی [۲۸] استفاده شد:

$$P(\text{kbar}) = -T(\text{K})/126.9 \cdot \ln[a^{\text{CPX}}_{\text{CaCrTs}}] + 15.483 \cdot \ln(\text{Cr}^{\text{CPX}}/T(\text{K}) + T(\text{K})/71.38 + 107.8)$$

$$(\text{Na} + \text{K}) a^{\text{CPX}}_{\text{CaCrTs}} = \text{Cr} - 0.81 \text{Cr}^{\#}$$

$$\text{Cr}^{\#} = (\text{Cr}/\text{Cr} + \text{Al})$$

به دلیل این که در بکارگیری این روش تنها دانستن سه پارامتر Cr، Al و Na در مورد ترکیب کانی کلینوپيروكسن کافی است، می‌توان آنرا روشی ساده و قابل اطمینان در تعیین فشار به حساب آورد [۲۸].

فشار بدست آمده با این روش برای هارزبورژیت‌ها 25 ± 2.4 کیلوبار است.

دماسنجی بر اساس الیوین - اسپینل

دماسنجی الیوین - اسپینل برای اولین بار توسط [۲۹] برای سنگ‌های لرزولیتی به کار گرفته شد. اساس این زمین دماسنجی بر جابه‌جایی Mg و Fe بین الیوین و اسپینل است. جابه‌جایی این کاتیون‌ها در کانی‌های الیوین و اسپینل در سنگ‌های پریدوتیتی حتی در زمان سرد شدن کامل این سنگ‌ها و دماهای بسیار پایین نیز ادامه می‌یابد و مانند دیگر زمین دماسنج‌های رایج، پیروكسن‌های همزیست در دماهای بالا قطع و ثابت نمی‌شوند. چندین دماسنج در این بخش قابل ذکر است [۳۱، ۳۰]. در روش [۳۰] که بر اساس تبادل Cr ، Fe^{2+} و Fe^{3+} و Mg استوار است فاکتور فشار موثر نیست و در آن دما از رابطه‌ی زیر بدست آمده است:

$$T_c = ((4250 \times Y^{\text{Cr}}_{\text{Spl}} + 1343)/(\ln K_{D2} + 1.825 \times Y^{\text{Cr}}_{\text{Spl}} \times 0.571) - 273)$$

$$K_{D2} = \ln K_{D1} - 4 \times Y^{\text{Fe}^{3+}}_{\text{Spl}}$$

$$K_{D1} = (X^{\text{Mg}}_{\text{Ol}} \times X^{\text{Fe}^{2+}}_{\text{Spl}}) / (X^{\text{Mg}}_{\text{Spl}} \times X^{\text{Fe}^{2+}}_{\text{Ol}})$$

دمای بدست آمده با دماسنج [۳۰]، ۷۷۹ درجه‌ی سانتیگراد است. دما با روش [۳۱] که در آن فشار نیز موثر است از طریق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$T_c = A + [16150 \cdot X^{\text{Cr}}_{\text{Spl}} + (25150 \cdot (X^{\text{Fe}^{3+}}_{\text{Spl}} + X^{\text{Ti}}_{\text{Spl}}))] / R \cdot \ln K_{D1} + 4.705 - 273.15$$

$$A = 6350 + 280 \cdot P_{\text{Gpa}} + [(7000 + 108 \cdot P_{\text{Gpa}}) \cdot 1 - 2 \cdot X^{\text{Fe}^{3+}}_{\text{Ol}}] - 1960 \cdot (X^{\text{Mg}}_{\text{Spl}} - X^{\text{Fe}^{3+}}_{\text{Spl}})$$

[7] Karipi S., Tsikouras B., Hatzipanagioutou K., Grammatikopoulos T.A., "Petrogenetic significance of spinel-group minerals from the ultramafic rocks of the Iti and Kallidromon ophiolites (Central Greece). *Lithos*", 99 (2007) 136-149.

[8] Arif M., M. Qasim Jan, "Petrotectonic significance of the chemistry of chromite in the ultramafic mafic complexes of Pakistan", *Journal of Asian Earth Sciences*, 27 (2006) 628-646.

[9] Dick H.J.B., Bullen T., "Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 86 (1984) 54-76.

[10] Droop G. T. R., "A general equation for estimating Fe^{+3} concentration in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses", using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine* 51(1987) 431-435.

[11] Soto J.I., sand Soto V.M., "PTMAFIC: software package for thermometry, barometry and activity calculations in mafic rocks using an IBM compatible computer", *Computers and Geosciences* 21 (1995) 619-652.

[12] Walker R.T., Gans P., Allen M., Jackson J., Khatib M.M., Marsh N., Saunders A., Zarrinkoub M.H., "Late Cenozoic volcanism and rates of active faulting in eastern Iran", *Geophysical Journal International* .,177 (2009)783-805.

[۱۳] زرین کوب م.ح، امینی ص، آفتابی ع، کریم پور م.ح، "کانی شناسی، زمین شیمی، موقعیت ساختمانی و ارایه مدل ژنتیکی برای لیستونیت های خاور ایران"، بلور شناسی و کانی شناسی ایران. سال سیزدهم، شماره ۲، پاییز و زمستان، (۱۳۸۴) ص ۳۶۳-۳۷۸

[14] Aftabi A., Zarrinkoub M.H., "Petrogeochemistry of listvenite association in metaophiolites of Sahlabad region, eastern Iran: Implications for possible epigenetic Cu-Au ore exploration in metaophiolites", *Lithos*, V. 156-159 (2013) 186-203.

[15] Barker A.J., "Introduction to metamorphic textures and microstructures. *Chapman and Hall*", (1990) 265P.

[16] Shelly D., "Microscopic study of Igneous and Metamorphic rocks", *Chapman & Hall*, London (1993) 184p.

نامتجانس اورتوپیروکسن‌ها تحت تاثیر واکنش گدازه-گوشته باشند. براساس نتایج بدست آمده از ترکیب شیمیائی اسپینل‌ها و الیوین‌ها، پریدوتیت‌های منطقه‌ی مورد بررسی، از نوع گوشته‌ای بوده و درجه ذوب بخشی حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد را نشان می‌دهند. ترموبارومتری بر اساس کانی‌های کلینوپیروکسن و اورتوپیروکسن، میانگین دمای تبلور هارزبورژیت‌ها را 1016 ± 100 در فشار ۲۵ کیلوبار بدست داده است.

قدردانی

بدین وسیله از همکاری دکتر مایکل بروکر در گروه علوم زمین دانشگاه مانسر آلمان جهت تجزیه نقطه‌ای کانی‌ها سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

[۱] شهیدی ع. فیروزی ب، شفیع ع، "نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین شناسی روم، سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور (۱۳۷۸).

[2] Tirrul R., Bell I.R., Griffis R.J., Camp V.E., "The Sistan suture zone of eastern Iran *Geological Society of America Bulletin*", V.94 (1983) 134-150.

[3] Babazadeh A.S., Robaszynski F., Courme M.D., "New biostratigraphic data from Cretaceous planktic foraminifera in Sahlabad province", eastern Iran, *Lithos*, V.40 (2007) 445-454.

[4] Zarrinkoub M.H., Kwan-Nang Pang K.N., Chung S.L., Khatib M.M., Mohammadi S.S., Chiu H.Y., Lee H.Y., "Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite", Sistan suture zone, eastern Iran, *Lithos* 154 (2012) 392-405.

[5] Zarrinkoub M.H., Chung S.L., Chiu H.Y., Mohammadi S.S., Khatib M.M., Lin J.H., "Zircon U-Pb age and geochemical constraints from the northern Sistan suture zone on the neotethyan magmatic and tectonic evolution in eastern Iran", An abstract paper in Turkey Symposium: Tectonic Crossroads: Evolving Orogens of Eurasia - Africa - Arabia (2011).

[6] Brocker M., Fotoohi Rad G. R., Thunissen S., "New time constraints for HP metamorphism and exhumation of mélange rocks from the Sistan suture zone", eastern Iran. An abstract paper in Turkey Symposium: Tectonic Crossroads: Evolving Orogens of Eurasia - Africa - Arabia (2011).

- [26] Kornprobst J., Ohnenstetter D., Ohnenstetter M., "Na and Cr contents in Cpx from peridotites: a possible discriminant between sub-continental and sub-oceanic mantle", *Earth and Planetary Science Letters* 53 (1981) 241-254.
- [27] Wood B.J., Banno S., "Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems", *Contributions to Mineralogy and Petrology.*, 42 (1973)109-124.
- [28] Nimis P., Taylor W. R., "Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 139 (2000) 541-554.
- [29] Evans B.W., Frost B.R., "Chrome-spinel in progressive metamorphism: A preliminary analysis", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 39 (1975) 959-972.
- [30] Fabriès J., "Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 69 (1979) 329-336.
- [31] Ballhaus C., Berry R.F., Green D.H., "High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implication for the oxidation state of the upper mantle", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 107 (1991) 27-40.
- [32] Kubo K., "Dunite formation processes in highly depleted peridotite: Case study of the Iwandake peridotite", *Hokkaido, Japan. Journal of Petrology*, V.43 (2002) 423-448.
- [17] Vernon R.H., "A practical guide to rock microstructure", Cambridge University Press, 594p (2004).
- [۱۸] امینی ص، زرین کوب م.ح، درویشزاده ع، "مطالعه گدازه‌های بازالتی همراه توالی افیولیتی بیرجند"، *مجله علوم دانشگاه تهران*. جلد ۲۶، شماره ۱، (۱۳۷۹) ص ۷۱ - ۹۱.
- [19] Deer W.A., Howie R.A., zussman J., "The Rock Forming Minerals", Second Edition. Longman Asia Ltd, Hong Kong, (1992) 696P.
- [20] Morimoto N., "Nomenclature of pyroxenes", *Mineralogical Magazine*, 52 (1988) 535-550.
- [21] Irvine T.N., "Chromian spinel as a petrogenetic indicator, part n. Petrologic applications", *Canadian Journal of Earth Sciences*, 4 (1967) 71-103.
- [22] Conrad W. K., Kay R. W., "Ultramafic and mafic inclusions from Adak Island: Crystallization history and implications for the nature of primary magmas and crustal evolution in the Aleutian arc", *Journal of Petrology* 25 (1984) 88-125.
- [23] Haggerty S. E., "Upper mantle opaque mineral stratigraphy and the genesis of metasomatites and alkali-rich melts", *Journal of Geological Society of Australia* 14 (1988) 687-699.
- [24] Kepezhinskas P. K., Defant M. J., Drummond M. S., "Na metasomatism in the island-arc mantle by slab melt-peridotite interaction: evidence from mantle xenoliths in the North Kamchatka arc", *Journal of Petrology* 36 (1995)1505-1527.
- [25] Arai S., "Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships", *Review and Interpretation. Chemical Geology* 113 (1994)191-204.