مجلة پژوهشي دانشگاه اصفهان (علوم پايه)
جلد بيست و نهم ـ شماره ۳ ـ سال ۱۳۸٦
صص ٦۰-٤۳

# روندهاي P-T شاهدي بر پلي متامورفيسم در سنگ‌هاي دگرگوني درجه بالا در زون مركزي كمپلكس ليمپاپو (آفريقاي جنوبي)

سيد محسن طباطبايي منش
گروه زمين شناسي دانشگاه اصفهان

## چكيده

روندهاي P-T به عنوان يكي از منحصر به فرد ترين راه‌هاي ثبت تحول دما ئي و دينا ميكـي كمـپلكس‌هـاي دگرگـوني و آذريـن محسوب مي‌گرد ند و بسياري از مدلهاي ژئوديناميكي كه بالاآمدگي كمپلكس‌هاي دگرگوني و آذرين را تفسير مي‌كنند بر اين رونـدها استوار هستند.

تعيين روندهاي P-T در سنگ‌هاي دگرگوني درجه بالا با استفاده از داده‌هاي پاراژنتيكي كا ني‌ها و تعادلات ترمودينا ميكـي ايجـاد شده مي‌توا نند مكا نيسم بالا آمدگي اين سنگ‌ها را تفسير كنند. در صورتي كه اين داده‌ها همراه با داده‌هاي ايزوتوپي گردد نه تنها بـه وسيله آنها مي‌توان طبيعت پلي متامورف اين سنگ‌ها را بيان نمود بلكه چگونگي برخاست اين سنگ‌ها نيز قا بل تفسير خواهـد بـود. آناليز روندهاي P-T نشان دهنده آن است كه جا بجائي سنگ‌هاي دگرگوني پركامبرين در زون مركزي كمپلكس ليمپـاپو بـه صـورت دوره اي بوده ا ست. اين سنگ‌ها ا بتدا تا بخش‌هاي ميا نه اي پوسته بالا آمده و سپس براي مدتهاي مديدي (تا چند صد ميليون سـال ) در آنجا باقي مي‌ما نند، در اين مرحله اين سنگ‌ها كه در وضعيت ناپايدار ثقلي بسر مي‌برند به واسطه شوك‌هاي حرارتـي و سـيالات نشا ت گرفته از گوشته و كا هش غلظت مجدداً فعال گشته و به سمت بالا حركت مي‌كنند.

واژه‌هاي كليدي: گرانوليت، روندهاي P-T ، پلي متامورفيسم، ليمپاپو.

# P-T Trend Evidence for Polymetamorphism in High Grade Metamorphic Rocks In the Central Zone of a Limpopo Complex (South Africa)

**S. M. Tabatabaei manesh**

Department of Geology, University of Isfahan

**Abstract**

P-T trends represent the single reliable source for thermal and dynamic record of metamorphic and igneous complexes and may serve as a basis for geodynamic models that simulate exhumation of such complexes from mantle. This study demonstrates that, knowledge of P-T trend configuration in combination with isotopic geochronology makes it possible not only to ascertain the nature of polymetamorphism but also to define a mechanism of rock exhumation. Analysis of P-T trends has shown that, the Precambrian granulite complex of Limpopo (South Africa) is repeatedly exhumed. First, this complex was accommodated within the crust and remained for long period of time ( up to few hundred million years ) and then, these rocks which were in a metastable state in the Earth's gravity field were reactivated by the fluid and heat flow from the mantle plume which caused the reduction in viscosity and upward movement toward the surface.

**Keywords:**Granulite, P-T trend, Polymetamorphism, Limpopo

## مقدمه

كمپلكس ليمپاپو به ابعاد ۷۰۰ × ۲۵۰ كيلومتر درآفريقاي جنوبي قرار گرفته و يكي از منحصر به فرد ترين مكانهاي طبيعي براي مطالعه سرزمين‌هاي دگرگون شده تحت تاثير رخساره گرانوليت مي‌باشد. اين كمپلكس بين كراتونهاي پركامبرين كاپوال*(Kaapvaal)* و زيمبابوه *(Zimbabwe)* قرار گرفته و به سه زون تكتونيكي تقسيم ميگردد: ۱- زون حاشيه ي شمالي.، ۲- زون حاشيه ي جنوبي.، ۳ - زون مركزي. زون‌هاي حاشيه ي شمالي و جنوبي تحت عنوان بخش‌هاي آركئن آغازين بوده و زون مركزي بين اين دو زون قرار گرفته است *(van Reenen et al., 2004)*.

زون مركزي توسط مجموعه اي از الگوهاي دگر شكل شده مشخص مي‌شود كه تحت تاثير دو دسته ي اصلي چين خوردگي غلافي *(Sheath fold)* و متقاطع *(Cross fold)* قرار گرفته اند *(van Reenen et al., 2004)*.

سه حادثه ي مهم در زون مركزي ليمپاپو قابل شناسايي مي‌باشد كه شاملند بر:

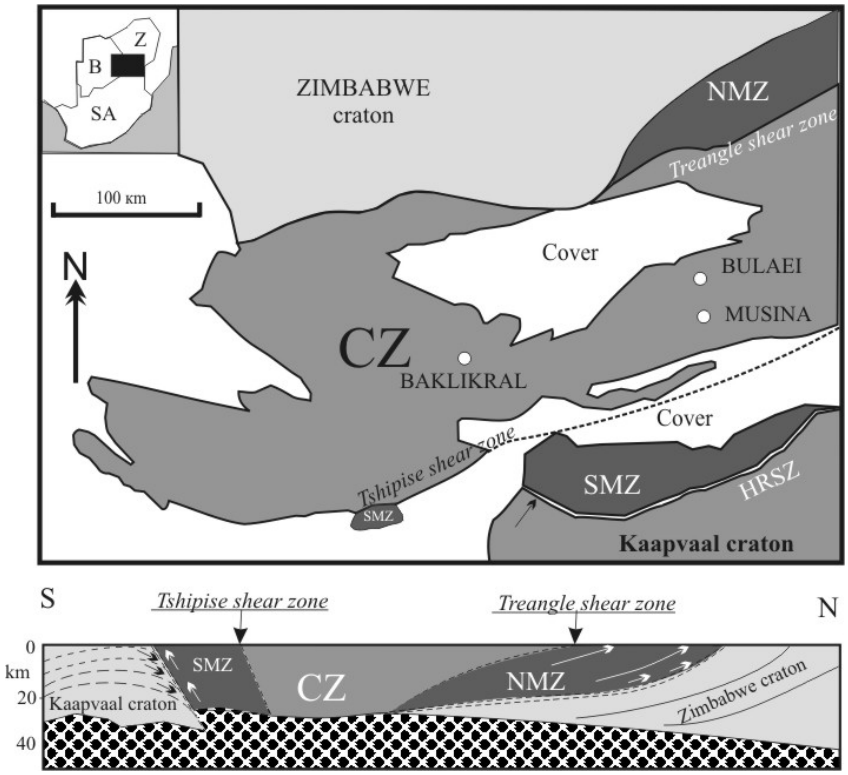
*1*) - حادثه مربوط به آركئن مياني به سن حدود ۳,۲ ميليارد سال كه آثارآن به صورت فعاليت‌هاي ماگمايي با اثرات بسيارجزيي از دگر شكلي‌هاي اوليه در منطقه ثبت شده و تحت عنوان اولين دگرگوني*M*۱ و اولين دگر شكلي *D*۱ شناخته مي‌شوند;۲)- رخدادهاي آركئن پاياني كه در طي آن (۲,۶ ميليارد سال) وقايع دگرگوني در حد رخساره ي گرانوليت اتفاق افتاده اند. اين دگرگوني بصورت كم فشاربوده ودردياگرام فشار- دما مسيري جهت عكس حركت عقربه‌هاي ساعت را نشان مي‌دهد. اين دگرگوني و دگر شكلي تحت عنوان *D*۲/*M*۲ شناخته مي‌شوند. (۳)- دگرگوني پالئوپروتروزوئيک (۲ ميليارد سال ) از نوع فشار بالا دما بالا بوده و روند آن در جهت حركت عقربه‌هاي ساعت مي‌باشد. اين دگرشكلي و دگرگوني تحت عنوان *D*۳/*M*۳ شناخته مي‌شوند. چهره وسيماي امروزي زون مركزي متاثر از اين دگر شكلي( *D*۳/*M*۳ ) مي‌باشد *(Schaller et al., 1999)*.

## روش تحقيق

مونه‌هاي مورد مطالعه در اين تحقيق توسط ميكرسكوپهاي الكتروني

***Cam Scan 4DV (Russian State University)*** و ***Cameca (Rand Afrikaans University)***

مورد آناليز و مطالعه قرار گرفتند. همچنين مجموعه اي از روش‌هاي متداول پترلوژيكي مانند خصوصييات بافتي و ساختي، آناليزهاي پاراژنتيكي، منطقه بندي كاني‌هاي همجوار بر اساس پروفيل‌هاي ميكروزوندي ونهايتآ محاسبات ترموبارومتري مورد استفاده قرار گرفت. در اين




شكل ١- نما ئي از ساختار زمين شناسي كمپلكس گرانوليتي ليمپاپو، واقع شده بين كراتونهاي پركامبرين كاپوال و زيمبا بوه ( آفريقاي جنوبي)

مطالعه توجه اصلي معطوف به پـاراژنز ***Opx, Grt, Crd, Bt*** در حـضور ***Qtz*** و ***Sil*** -/+ بـه عنـوان مجموعـه كانيـايي حساس به تغيير شرايط دگرگوني گرديـد و نتيجـه گيـري روندهاي ***P-T*** بر اساس متد پرچـوک ***(Perchuk., 1996, 2005)*** انجـام پـذيرفت. بطـور كلـي دراين تحقيـق بـيش از١٠٠٠ ميكروآناليز با روش پروفيل‌هاي ميكروزوندي بـر روي كاني‌هاي مختلف صورت گرفت.

علائم اختصاري: آفريقاي جنوبي -***SA***, بتسوا نـا -***B***, زيمبـا بوه-***Z***, زون حاشيه شمالي ***NMZ*** , زون مركزي ***CZ*** , زون حاشيه جنوبي ***SMZ*** .
***(Perchuk et al., 1996)***

علائم اختصاري مورد استفاده در متن

***D2/D2*** سـيكل دگرشـكلي ***(D)*** و دگرگـوني ***(M)*** نئـو ارکئن (٢,٦-٢,٧ ميليارد سال)، ***D3/M3*** سيكل دگرشكلي ***(D)*** و دگرگـوني ***(M)*** پروترزوئيـک آغـازي(٢~ ميليـارد سال)، ***(IH)*** گداخت در فشار ثا بت يا ***Isobaric Heating***، ***(ID)*** كـاهش فـشار در دمـاي ثـا بـت يـا ***Isothermic Decompression***، ***(DC)*** سرد شدگي همراه با كاهش فـشار يا ***Decompression Cooling*** ،

***And*** – آنـدالوزيت, ***Grt*** – گارنـت، ***Ilm***– ايلمنيـت،***Kfs***–كالي فلدسپار ,كيانيت –***Ky***, مسكوويت – ***Ms***, آپاتيـت , ***Ap*** –بيوتيـت – ***Bt***, كلـسيت – ***Cal***, كرديريـت – ***Crd*** , -كومينگتونيـت – ***Cum*** ,ارتـو آمفيبـول – ***OAm***, ارتـو پيروكـسن – ***Opx***, ارتـوكلاز - ***Or***, فلوگوپيـت – ***Phl*** پلاژيـوكلاز – ***Pl***, پيـروپ – ***Prp***, فورسـتريت – ***Fo***, انـستا تيت – ***En***, كـوارتز – ***Qtz***, روتيـل –***Rut***, سـانيدين – ***San*** , سيليمانيت – ***Sil***, اسفن – ***Sph***, اسپينل– ***Spl*** , سـا فيـرين ,

*Spr*– محلولهاي جامد كانيها

*,( Crd- Mg, Crd- Fe),( Gr- Mg, Gr Fe)-,(Opx-Mg, Opx-*
*, R= 1.987* ثابت گازها *Fe)- ( Bt- Mg, Bt- Fe)*

*cal/grad (1 cal= 4.186 j)* تغييرات انرژي آزاد گيبس – $G^o$، ثابت تعادل واكنش - *Kp*، فشار– *Kbar/bar P*، دما - *K/C T*،

*, Ni= 100 Xi, XMg* ، *NMg– Mg number* =*Mg/(Mg+Fe)* ، سهم مولي جزئ *i* در فاز مورد نظر= *Xi* ،

$X_{Ok}^{Opx}$ *=0,5 Al/(0,5Al+Fe+Mg) of Opx,* $N_{Ok}^{Opx}$ *=100,*
$X_{Ok}^{Opx}$ *,* $X_{Al}^{Bt}$ *= Al/(Al+Si+Ti+Fe+Mg+Mn) of Bt*

$\mu_{H2O}$= - $a_{Crd}$ ، پتانسيل شيميائي آب - فعاليت كردييريت $\mu^o_{H2O}$ *+RTln* $a^{fl}_{H2O}$ ، فعاليت آب در سيال $a^{fl}_{H2O}$ ، حجم *V*–، انتروپي – *S*، آنتالپي- *H*.

پتروگرافي و شيمي كاني ها

صوصييتي كلي براي سنگ‌هاي هرسه زون كمپلكس گرانوليتي ليمپاپو وجود بافت‌هاي پرفيروبلاستي در سنگ‌هاي دگرشكل نشده و بافت‌هاي بلاستوميلونيتي درسنگ‌هاي دگرشكل شده مي‌باشد. دسته آخر (سنگ‌هاي دگرشكل شده) هم در شييرزون‌هاي هم زمان با تحول نئوآركئن و هم درشييرزون‌هاي پروترزوئيک آغازي ديده مي‌شوند كه اين مشخصه سنگ شناختي مخصوصآ براي سنگ‌هاي زون مركزي قابل اهميت است. در مكان هائي تشخيص اين دو دسته شييرزون بسيار مشكل مي‌باشد. در ادامه بصورت اختصار پتروگرافي گنايس‌هاي متاپليتي از هر سه زون كه تحول دمائي و ديناميكي كمپلكس گرانوليتي ليمپاپو براساس آنها استوار شده بيان مي‌گردد.

الف- پتروگرافي زون حاشيه شمالي

در اين زون پنج گروه سنگي قابل مشاهده است كه كليه آنها ساخت‌هاي توده اي و بافت‌هاي لپيدوگرانوبلاستيكي نشان مي‌دهند. اين سنگ‌ها عبارتند از:

١- ارتوپيروكسن- گارنت گنا يس‌ها *(Kfs+Qtz+Opx+ Pl+ Bt+Grt)* .

٢- بيوتيت- كرديريت- گارنت گنا يس‌ها *(Kfs+Qtz+Sil+Crd+Pl+Bt+Grt)* .

٣- فلوگوپيت- سافيرين- كرديريت- ارتوپيروكسن گنا يس‌ها *(Opx+Sil+Bt+Spr+ Crd+ Spl)* .

در اين سنگها دو نسل از *Opx* و *Spr* ديده ميشود. $Opx_1$ به همراه *Crd* و $Opx_2$ به همراه مجموعه *Spr, Spl* و *Phl*. نسل‌هاي مختلف كاني‌ها بر اساس تركيب شيميائي مجزا مي‌گردند شكل (٢*a,b*).

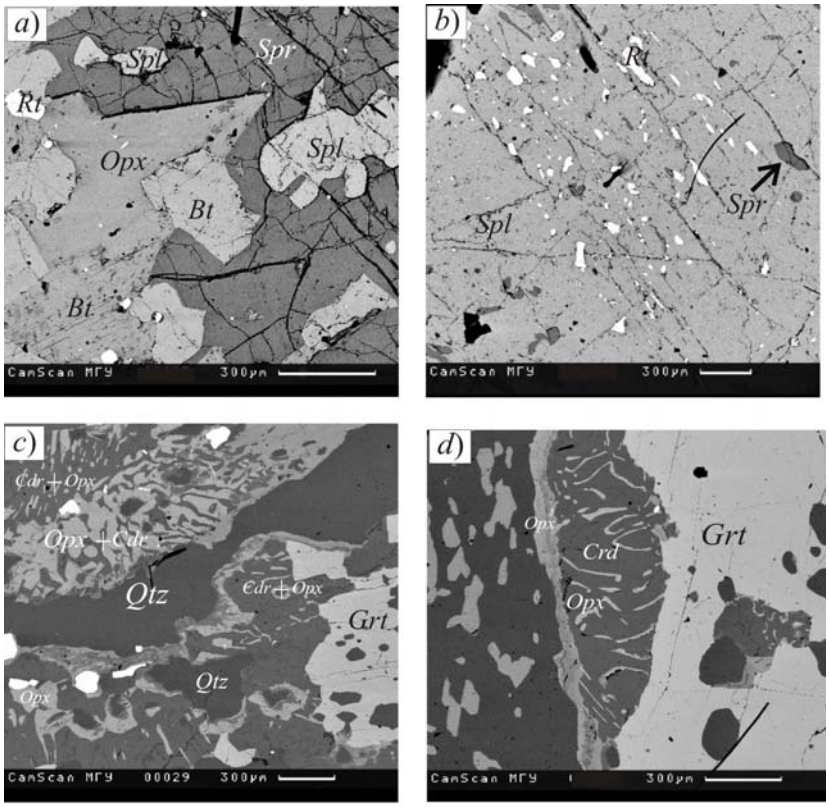
٤- ارتوپيروكسن- كرديريت- گارنت- كوارتز شيست‌هاي متبلور *(Opx+ Bt+ Qtz+ Grt+ Crd)* .

در اين سنگ‌ها دو بخش كاملآ مجزا قابل تشخيص بوده كه عبارتند از: ١- بخش زمينه اي و ٢- بخش متشكل از بافت‌هاي واكنشي. زمينه سنگ از گارنت، بيوتيت و كوارتز تشكيل شده و بافت‌هاي واكنشي متشكل ازسيمپلكتيت *Crd+Opx* مي‌باشد. اين بافت‌ها درمحل كنتاكت كوارتز و گارنت تشكيل شده اند شكل (٢*c,d*).

٥- متاپليتهاي دو ميكائي واجد گارنت- بيوتيت و مسكوويت *( Bt+ Qtz+ Grt+ Ms)* .

ارنت‌هاي موجود در اين سنگ‌ها نسبت به گروه‌هاي قبلي منطقه بندي بسيار ضعيف تري نشان مي‌دهند و $N_{\mathrm{Mg}}^{Grt}$ در آنها بين ٣٠-٣٢ تغيير مي‌نمايد. مسكوويت موجود در اين سنگ‌ها ثانوي بوده و شديدا دگرسان شده مي‌باشد.

(*Tabatabaei manesh, 2005*)




شكل٢- متاپليت‌هاي زون شمالي **(a-b;** دو نمونه از**Crd+Spl+Spr+Sil+Opx+Ph l** متاپليت‌هاي زون حاشيه شمالي; **c-d)** بافتهاي واكنشي سيمپلكتيتي توسعه يافته بين كوارتز و گارنت در متاپليت‌هاي زون شمالي.

ب- پتروگرافي زون حاشيه جنوبي

سنگ‌هاي دگرشكل نشده اين زون شامل گنايس‌هـاي گرانوبلاستيكي با تركيب تونا ليتي همراه با متابازيـت هـا، اولترابازيت‌ها و متاپليت‌ها مـي‌باشـند كـه بعـضي اوقـات توسـط تـوده‌هـاي كوچـك گرانيتوئيـدي، اينـدربيتي و شارنوكيتي قطع شده اند. بافـت‌هـاي واكنـشي زيـر بطـور وسيع در متاپليت‌ها گستردگي دارند.

$$Grt+Orz \Rightarrow Opx+Crd \qquad (1)$$

$$Grt+Qtz+Sil \Rightarrow Crd \qquad (2)$$

ر متاپليت‌هاي زون حاشيه جنوبي در نزديكي كنتاكـت آنها با سنگهاي كراتون كاپوال واكنش( ٢ ) به سمت چـپ حركت كـرده و حاشـيه هـائي از $Grt_2$-$Qtz$-$Sil$ بـه خـرج پرفيروبلاست‌هاي *Crd* تشكيل شده است. بعلاوه واكنش( ٢ ) برخي اوقات توسط واكنش( ١ ) پوشانده شـده اسـت كه اين پديده نشانه سرد شدگي همراه با كـاهش فـشاردر روند تحولي آنها مي‌باشد( ***Perchuk et al., 1996*** ) .

در شـيبرزونهائي كـه گنـايس‌هـاي گرانوبلاسـتي را قطـع مي‌كنند، بلاستوميلونيت‌ها بسيار گسترده بوده و درآنها نيـز بافت‌هاي واكنشي (١) و (٢) قابل مشاهده مي‌باشند.

ج- پتروگرافي زون مركزي

در مطالعـه زون مركـزي توجـه اصـلي معطـوف بـه متاپليت‌ها در ناحيه باكليكرال ***(Baklikral)*** گرديـده اسـت. اين سنگ‌ها حاوي كاني هـائي هـستند كـه مـي‌تواننـد بـا اسـتفاده از پايگـاه داده‌هـاي ترموديناميكي و محاسـبات ترموباروميتري تحول حرارتي و دينـاميكي ايـن زون را بـه

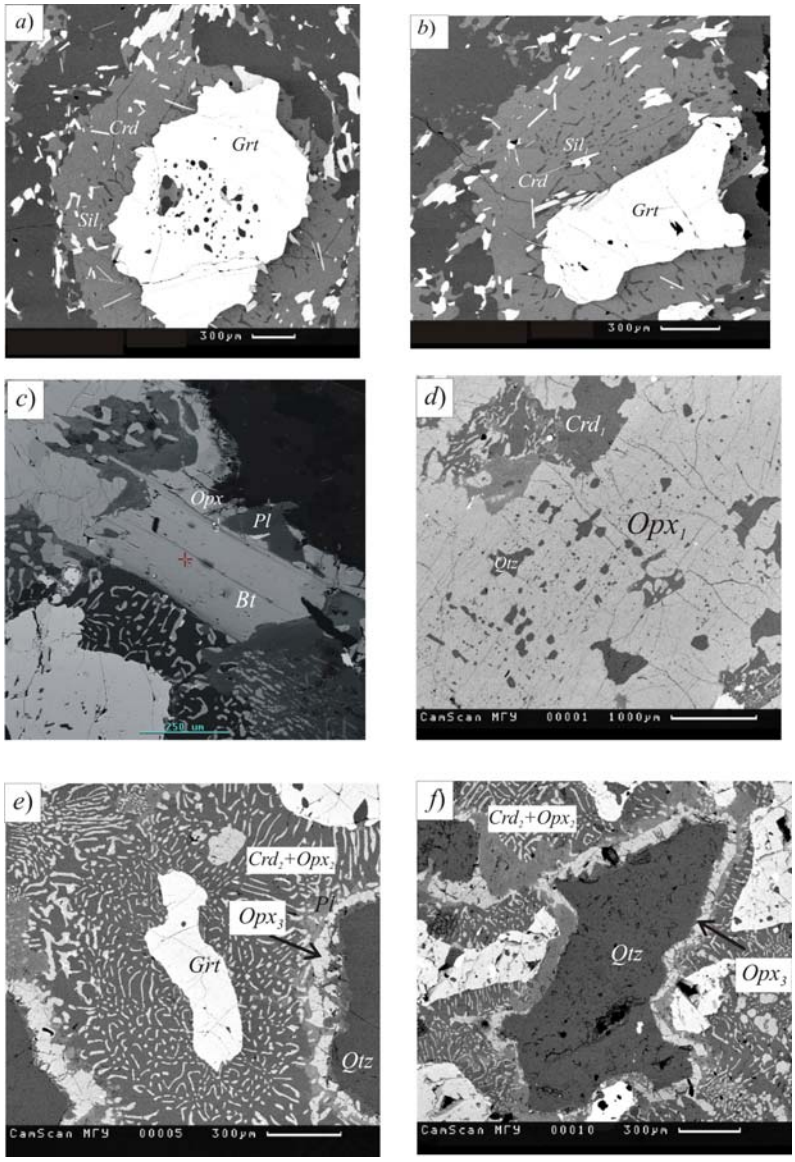
خوبي بيان كنند. همانگونه كه در قبلآ بيان شد در اين زون دو دسته اصلي چين خوردگي ديده مي‌شود كه عبارتند از:
١- چين‌هاي متقاطع ٢- چين‌هاي غلافي. سنگ‌هاي موجود در اين چين‌ها تاريخچه تحولي (*P-T*) متفاوتي از خود نشان مي‌دهند كه بيانگر تاثير دو فاز دگرگوني در تشكيل آنها مي‌باشد. در چين‌هاي متقاطع ناحيه باكليكرال سنگ هائي به سن ٢ ميليارد سال و در چين‌هاي غلافي سنگ هائي به سن ٢,۶ تا ٢,٧ ميليارد سال يافت مي‌شوند *(Tabatabaei manesh, 2005)*. اين سنگ‌ها به چهار دسته قابل تقسيم بوده كه عبارتنداز:
١-گنايس‌هاي آمفيبول دار غني از منيزيم;
٢-بيوتيت گارنت شيست ها;
٣-مرمرها و سنگ‌هاي كالك سيليكاته;
۴-متاپليت ها;
متاپليت‌هاي ناحيه باكليكرال

بر اساس تركيب كاني شناسي متاپليت‌هاي ناحيه باكليكرال در دو دسته اصلي قرار ميگيرند كه عبارتند از:
الف- گارنت كرديريت بيوتيت سيليمانيت كوارتز گنايس‌ها;
ب- كرديريت بيوتيت ارتوپيروكسن گارنت كوارتز گنايس‌ها;

دسته اول به صورت عدسي، بودين و يا لايه‌هاي ظريف در گارنت بيوتيت گنايس‌ها و يا در متابازيت‌ها و مرمرها و يا حتي در كوارتزيت‌ها قابل مشاهده مي‌باشند. اين دسته از سنگ‌ها بافت‌هاي بلاستوميلونيتي نشان مي‌دهند. دسته دوم (ب) نيز به همان تنوع دسته اول قابل مشاهده اند ولي بر خلاف آنها بافت‌هاي گرانوبلاستيكي از خود نشان مي‌دهند. ماتريكس دانه ريز گنايس‌هاي گروه اول از دانه‌هاي ريز ايزومتريک با حاشيه صاف تشكيل شده و اندازه متوسط آنها ٠،١ تا ٠،٢ ميليمتر مي‌باشد. درشت بلورهاي گارنت داراي ابعادي از ٠،۵ تا ۶ ميليمتر بوده و غالبا حاشيه واكنشي از خود نشان مي‌دهند. گاهي در اين سنگ‌ها مجموعه $Sil+\ Crd + Qtz$ كاملا جايگزين دانه‌هاي گارنت شده و تنها باقيمانده هائي از آن به چشم مي‌خورد. اين فرايند تحت تاثير واكنش $Grt+Qtz+Sil \Rightarrow Crd$ اتفاق افتاده است شكل (٣*a,b*) *(Tabatabaei manesh, 2006)* .

در اين سنگ‌ها ادخالهاي بسيار ريز سيليمانيت نسل اول( $Sil_1$ ) در كوارتز ، گارنت و يا كرديريت ديده مي‌شوند. سيليمانيت‌هاي نسل دوم ( $Sil_2$ ) در حاشيه‌هاي واكنشي به همراه $Bt\ –Qtz$ بوده و حاصل واكنش $Grt+Kfs+H_2O \Rightarrow Bt_2+Sil_2+Qtz$ هستند. سيليمانيت‌هاي نسل سوم يا ( $Sil_3$ ) كاني اصلي تشكيل دهنده شيبرزونها بوده و تا ٩٠ درصد مدال مجموعه‌هاي تشكيل دهنده شيبرزونها را شامل مي‌شوند. كرديريت در اين دسته از سنگ‌ها (گروه الف ) به صورت دانه‌هاي كاملا آلتره شده و يا به صورت كاني تشكيل دهنده مجموعه حاصل از واكنش $Grt+Qtz+Sil\Rightarrow Crd$ ديده مي‌شوند.

ب- كرديريت بيوتيت ارتوپيروكسن گارنت كوارتز گنايس‌هاي گروه (ب) فاقد لوكوسم بوده و به عنوان سنگ‌ها يي تيره با درصد پايين $SiO2$ محسوب مي‌شوند. در مقطع ميكروسكپي اين سنگ‌ها از دو بخش بافت‌هاي واكنشي و ماتريكس گرانوبلاستيكي تشكيل شده اند و سيمپلكتيت‌هاي بارز $Crd_2+Opx_2$ بافت اصلي واكنشي را در اطراف گارنت تشكيل مي‌دهند وهمزمان با آن حاشيه اي از $Opx_3$ فقير از $Al$ نيز در اطراف كوارتز مشاهده مي‌شود *(Tabatabaei manesh., 2005)*. ماتريكس گرانوبلاستي متشكل از $Bt + Pl + Opx_1 + Crd_1 + Qtz$ به همراه مقادير اندكي ايلمنيت، زيركن، و روتيل مي‌باشد. در




شكل ٣- چند نمونه از سنگ‌هاي دگرشكل شده و دگرشكل نشده باكليكرال **a-b)** توسعه بافت واكنشي **$Grt+Qtz+Si1_1$ =>** **Crd** در متاپليت‌هاي دگرشكل شده; **c)** بيوتيت توسط ارتوپيروكسن بلوكه و احاطه شده و عدم وجود **Kfs** نشان دهنده انجام واكنش مجازي ( مذاب گرانيتي )**Bt+Qtz = Opx+** در متاپليت دگرشكل نشده **JC1** ميباشد; **d)** ارتوپيروكسن وكرديريت نسل اول در نمونه دگرشكل نشده**JC1** ; **c-d)** بافت‌هاي واكنشي سيمپلكتيتي توسعه يافته بين كوارتز و گارنت.

بعضي از مكانهـا ٢ ***Opx*** بـدون واسـطه و مـستقيمآ وارد ***Opx***٣ شده كه تنها وجه تمايز آن مقدار بيشتر ***Al*** در ***$Opx_2$*** است. گارنت موجود در اين سنگ‌ها شديدآ داراي منطقـه بندي مي‌باشد و مركز آن پر از ادخالهاي ريز (در حد چند ميكـرون) ***Bt*** ، ***Pl*** ، ***$Opx_1$*** ، ***$Crd_1$*** ، ***Qtz*** ، ***Spl*** ,***Spr*** ,***Rt*** و ***Sil*** است. معمولآ در حاشيه اين گارنت‌هـا هيچگونـه ادخـالي مشاهده نمي شود. اندازه ادخال‌هـاي كرديريـت و كـوارتز برخـي از اوقـات بـه ١٠٠ ميكـرون مـي‌رسـد شـكل (٣). گارنت‌هاي موجود در بافت‌هاي واكنشي كشيده يا آتـولي شكل بوده و تا اندازه‌هاي ٧-٨ ميليمتر نيز ديده مـي‌شـوند

شکل (۳*a,b*). گارنت بـه صـورت ادخـال در هـیچ کـاني دیگـري یافـت نمـي شـود. $Opx_1$ موجـود در مـاتریکس گرانوبلاسـتیکي بـصورت دانـه‌هـاي کـشیده و حـاوي ادخالهـاي $Qtz$، $Spl$ ,$Spr$ ,$Rt$ و $Bt$ بـوده شـکل (۳*c,d*) و ارتوپیروکسن($Opx_2$) موجود در بافت‌هاي سیمپلکتیتي بـه صورت دانه‌هاي کرمي شکل مي‌باشند شکل (۳*e,f*).

مطالعات پتروگرافي بیانگر آنست که ارتباطات کانیـائي متاپلیت‌ها مشخص کننده توسعه حداقل سـه دسـته بافـت واکنشي در این سنگ‌ها مي‌باشد که عبارتند از:

۱- جانشیني مجموعه $Grt+Qtz$ توسط پـاراژنز $Opx+Crd$ بر اساس واکنش $Grt+Orz => Opx+Crd$ ;

۲- جانشیني گارنت $(\pm Sil_1+Qtz)$ توسـط کردیریـت بـر اساس واکنش $Grt+Qtz+Sil => Crd$ ;

۳- جانـــشیني مجموعـــه $Grt+Kfs$ توســـط پـــاراژنز $Bt+Qtz+Sil$ بر اساس واکنش

$Grt+Kfs+H_2O => Bt_2+Sil_2+Qtz$ ;

واکنش‌هاي تبادلي زیر نیز در این سنگ‌هـا قابـل مـشاهده است :

۴- $Grt_{Mg} + Crd_{Fe} = Crd_{Mg} + Grt_{Fe}$ ;

۵- $Grt_{Mg} + Bt_{Fe} = Bt_{Mg} + Grt_{Fe}$ ;

شرایط ترمودینامیکي تعادلات منطقه اي کاني ها رژیم فشارشي و دمائي در تحول ژئودینامیکي سـنگ‌هـاي دگرگون شده رخساره گرانولیت به خـوبي در رونـد *P-T Trend* ) آنها منعکس مي‌گـردد *(Perchuk, 1973, 1977)*. به همـین منظـور از آنـالیز نقطـه اي کـاني‌هـا ئـي کـه در تعادلات منطقه اي شرکت نموده ا نـد اسـتفاده مـي‌شـود. براي محاسبه پارامترهاي ترمودینامیکي در تعادلات کانیائي فوق از با نک داده‌ها ي پرچوک استفاده و از واکنش‌هـاي ۱،۲ و۳ براي محاسبه فشار و فعالیت آب و از واکنش‌هاي تبادلي $Grt_{Mg} + Bt_{Fe} = Bt_{Mg} + Grt_{Fe}$ و $Grt_{Mg} + Crd_{Fe} = Crd_{Mg} + Grt_{Fe}$ براي محاسبه دما استفاده گردید.

روش محاسبه فعالیت آب $a^{fl}_{H_2O}$ وهمچنـین ایزوپلیـت‌هـا براي تعادلات دي واریا نتي کاني‌هاي *Fe-Mg* دار در بسیاري از متاپلیت‌هاي زون مرکزي لیمپـاپو مجموعـه کانیائي$Bt+Sil+Qtz+Kfs+Grt$ قابل مشاهده است. بر همین اساس و با توجه به واکنش $Grt+Kfs+H_2O = Bt+Sil_2+Qtz$ مي‌توان فعالیت آب در سیال را با توجه به معادلـه $a^{fl}_{H_2O} = exp[\Delta G_{(2)}/RT]$ محاسبه نمود

درجائیکه

$$\Delta G_{(2)} = \Delta H^o_{(2)} - T\Delta S^o_{(2)} + P\Delta V^o + G^m_{San} + G^m_{Prp} + G^m_{Phl} - f^{fl}_{H_2O} RTln$$

برابر است با در شرایط تعادل، انرژي گیبس واکنش (۲)

$$\Delta G_{(1)} = \Delta H^o_{(1)} - T\Delta S^o_{(1)} + P\Delta V^o_{(1)} + (G^m_{Prp})^{Crd} + {}^m_{Mg} = 0$$

ایزوپلیت‌ها براي کاني‌هاي موجـود در مجموعـه‌هـاي متاپلیتي *(Grt, Opx, Crd , Bt)* به روش حـل سیـستم‌هـاي غیر وابسته معادلات ترمودینامیکي براي واکنش‌هاي متصل و با در نظر گرفتن وابستگي $a^{fl}_{H_2O}$ با دما براي هـر نمونـه محاسبه گردید *(Tabatabaei manesh, 2006)*.

نتـایج محاسـبه پارامترهـاي ترمودینـامیکي در تعـادلات کانیائي زون مرکزي:

الف- گرانولیت‌هاي ساختار باکلیکرال

الف-۱. روند *P-T* براي سنگهاي دگرشکل شده *(D3/M3)*. در سنگ‌هاي دگرشکل شده همراه بـا مجموعـه پـاراژنزي $Crd+Grt+Sil+Qtz+Bt+Kfs$ ،مسکوویت( *Ms*) نیـز وجـود دارد. این کاني در این سنگ‌ها بسیار نادر بـوده و در همـه شرایط به عنوان کاني ثانویـه حـضور دارد کـه بـر اسـاس واکـنش $(Or+Sil+H_2O => Ms+Qtz)$ و بـه خـرج *Kfs* و $Sil_2$ تشکیل شده اسـت. در هـر حـال وجـود مـسکوویت بیانگر دماي پائین در طـي دگرگـوني برگـشتي مـي‌باشـد. بطور کلي با عنایت به مطالب فوق الذکر مي‌توان گفت که

جدول۱- پارامترهاي فشار - دما ونتايج محاسبه فعاليت آب براي ۲۵ مجموعه *Bt+Sil+Qtz+Kfs+Grt* در متاپليت‌هاي ساختار باكليكرال در زون مركزي ليمپاپو *(van Reenen et al., 2004)* .

| ***Bt*** | ***Grt*** | ***Fsp*** | $X_{Mg}^{Bt}$ | $X_{Mg}^{Grt}$ | $X_{Or}^{Fsp}$ | ***P, kbar*** | ***T °C*** | $a_{H_2O}^{fl}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***3*** | | | | | | | | |
| ***95-1 c*** | ***95 c*** | ***95*** | ***0,446*** | ***0,174*** | ***1*** | ***4*** | ***660*** | ***0,371*** |
| ***95-2 c*** | ***95 c*** | ***95*** | ***0,446*** | ***0,174*** | ***1*** | ***4*** | ***659*** | ***0,332*** |
| ***96-2*** | ***95 r1*** | ***90*** | ***0,444*** | ***0,176*** | ***1*** | ***3*** | ***615*** | ***0,379*** |
| ***96-3*** | ***34*** | ***90*** | ***0,442*** | ***0,228*** | ***1*** | ***6*** | ***751*** | ***0,331*** |
| ***91 95 r2*** | ***90*** | ***0,501*** | ***0,148*** | ***1*** | ***3*** | ***573*** | ***0,363*** | |
| ***.T20*** | | | | | | | | |
| ***32 c*** | ***31 c*** | ***104*** | ***0,539*** | ***0,236*** | ***0,943*** | ***4*** | ***663*** | ***0,274*** |
| ***32 r*** | ***31 r (Qtz)*** | ***107*** | ***0,551*** | ***0,184*** | ***0,943*** | ***4*** | ***597*** | ***0,278*** |
| ***32 r*** | ***31 r (Bt)*** | ***107*** | ***0,551*** | ***0,183*** | ***0,943*** | ***3*** | ***600*** | ***0,235*** |
| ***43 c*** | ***42 c*** | ***107*** | ***0,551*** | ***0,272*** | ***0,943*** | ***5*** | ***697*** | ***0,252*** |
| ***43 c*** | ***42 2*** | ***104*** | ***0,551*** | ***0,267*** | ***0,943*** | ***5*** | ***690*** | ***0,253*** |
| ***43 c*** | ***42 3*** | ***107*** | ***0,551*** | ***0,257*** | ***0,943*** | ***5*** | ***677*** | ***0,248*** |
| ***43 r*** | ***42 r (Qtz)*** | ***107*** | ***0,551*** | ***0,210*** | ***0,943*** | ***4*** | ***619*** | ***0,276*** |
| ***46 c*** | ***45 c*** | ***107*** | ***0,542*** | ***0,217*** | ***0,943*** | ***4*** | ***636*** | ***0,281*** |
| ***48 c*** | ***48 c*** | ***104*** | ***0,532*** | ***0,214*** | ***0,943*** | ***4*** | ***640*** | ***0,276*** |
| ***108*** | ***110 c*** | ***107*** | ***0,522*** | ***0,270*** | ***0,943*** | ***5*** | ***724*** | ***0,263*** |
| ***108*** | ***109 r*** | ***107*** | ***0,522*** | ***0,231*** | ***0,943*** | ***4*** | ***673*** | ***0,283*** |
| ***105 c*** | ***106 r*** | ***107*** | ***0,504*** | ***0,192*** | ***0,943*** | ***4*** | ***635*** | ***0,306*** |
| ***46 c*** | ***42 r 2*** | ***104*** | ***0,542*** | ***0,185*** | ***0,943*** | ***3*** | ***593*** | ***0,312*** |
| ***T18*** | | | | | | | | |
| ***1 c 4 c*** | ***2 c*** | ***0,526*** | ***0,225*** | ***0,962*** | ***4*** | ***659*** | ***0,294*** | |
| ***1 r (Fsp)*** | ***4 r*** | ***2 r*** | ***0,523*** | ***0,219*** | ***0,972*** | ***4*** | ***654*** | ***0,294*** |
| ***6 c 7 c*** | ***5*** | ***0,539*** | ***0,225*** | ***0,962*** | ***4*** | ***659*** | ***0,274*** | |
| ***6 r 7 r*** | ***5*** | ***0,543*** | ***0,201*** | ***0,972*** | ***4*** | ***614*** | ***0,271*** | |
| ***23 r*** | ***24 r*** | ***22*** | ***0,532*** | ***0,201*** | ***0,965*** | ***4*** | ***667*** | ***0,280*** |
| ***23 c*** | ***24 c*** | ***22*** | ***0,537*** | ***0,190*** | ***0,965*** | ***4*** | ***653*** | ***0,299*** |
| ***1 r (Qtz)*** | ***4 r*** | ***2 r*** | ***0,544*** | ***0,219*** | ***0,972*** | ***4*** | ***636*** | ***0,260*** |

ذوب بخشي از مشخصات سنگ‌هاي دگرشكل شده زون مركزي محسوب نمي گردد. بنابر اين واكنش (۲) در محدوده نسبتآ باريكي از $a^{fl}_{H_2O}$ **-P-T** اتفاق مي‌افتد . از اين محدوده دمائي براي تصحيح ايزوپليت‌هاي ***Crd*** و ***Grt*** وهمچنين تعيين $a^{fl}_{H_2O}$ براي هر تعادل منطقه اي در دماي ***T*** كه توسط ترمومتر ***Bt-Grt*** محاسبه شده استفاده گرديد. در محدوده ساختار باكليكرال محاسبات ترموديناميكي براي سه نمونه ***T18, T73*** و***T20*** انجام گردفت. براي نمونه ***T73*** منحني خطي ***-0,5017*** = $a^{fl}_{H_2O}$ ***0,0002247·T(°C)*** وابستگي دما با $a^{fl}_{H_2O}$ را بيان مي‌كند. اين وابستگي براي نمونه ***T20*** برابر = $a^{fl}_{H_2O}$ ***0,4643-0,0002966·T(°C)*** مي‌باشد. در نمونه ***T18*** بر خلاف نمونه‌هاي ***T73*** و***T20*** وابستگي منظمي از $a^{fl}_{H_2O}$ (در محدوده ***0,260 – 0,294*** ) به عنوان تابعي از دما ديده نمي شود جدول (۱).

به همين دليل متوسط $a^{fl}_{H_2O}$ را ***0,282*** در نظر مي‌گيريم ***(van Reenen et al., 2004)*** .

الف-۲ . روند *P-T* براي سنگهاي دگرشكل نشده ***(D2/M2)***.

در سنگ‌هاي دگرشكل نشده ساختار باكليكرال سه دسته از بافت‌هاي واكنشي مشاهده مي‌گردد كه عبارتند از:

۱- سيمپلكتيت‌هاي ***Opx-Crd*** كه بر اساس واكنش ***Grt+Orz => Opx+Crd*** در اطراف گارنت تشكيل شده و توسط حاشيه اي از ***Opx*** و***Pl*** فراگرفته شده اند شكل(۳).

جدول۲- پارامترهاي فشار-دماي تعادلات منطقه اي براي مجموعه **Qtz+ Sil+ Grt+ Crd** در متاپليت‌هاي **T73** ، **T20** و **T18** از ساختار **Baklikral** در زون مركزي ليمپاپو**(van Reenen et al., 2004)** .

| $X^{Crd}_{Mg}$ | $X^{Grt}_{Mg}$ | ***T °C*** | $a^{fl}_{H_2O}$ | ***P, kbar*** |
|---|---|---|---|---|
| | | ***T73*** | | |
| ***0,629*** | ***0,146*** | ***591*** | ***0,369*** | ***2,95*** |
| ***0,621*** | ***0,146*** | ***599*** | ***0,367*** | ***3,02*** |
| ***0,621*** | ***0,156*** | ***620*** | ***0,362*** | ***3,33*** |
| ***0,659*** | ***0,180*** | ***623*** | ***0,362*** | ***3,66*** |
| ***0,645*** | ***0,180*** | ***640*** | ***0,358*** | ***3,81*** |
| ***0,620*** | ***0,168*** | ***646*** | ***0,357*** | ***3,72*** |
| ***0,614*** | ***0,168*** | ***653*** | ***0,355*** | ***3,78*** |
| ***0,632*** | ***0,181*** | ***658*** | ***0,354*** | ***3,98*** |
| ***0,620*** | ***0,177*** | ***665*** | ***0,352*** | ***3,99*** |
| ***0,620*** | ***0,179*** | ***669*** | ***0,351*** | ***4,06*** |
| ***0,637*** | ***0,194*** | ***678*** | ***0,349*** | ***4,30*** |
| ***0,610*** | ***0,178*** | ***679*** | ***0,349*** | ***4,14*** |
| ***0,620*** | ***0,184*** | ***679*** | ***0,349*** | ***4,21*** |
| ***0,627*** | ***0,191*** | ***685*** | ***0,348*** | ***4,34*** |
| ***0,620*** | ***0,188*** | ***688*** | ***0,347*** | ***4,33*** |
| ***0,629*** | ***0,196*** | ***692*** | ***0,346*** | ***4,46*** |
| ***0,612*** | ***0,189*** | ***700*** | ***0,344*** | ***4,48*** |

ادامه جدول (۲)

| $X_{Mg}^{Crd}$ | $X_{Mg}^{Grt}$ | $T\,^oC$ | $a_{H_2O}^{fluid}$ | P, kbar |
|---|---|---|---|---|
| 0,626 | 0,202 | 708 | 0,343 | 4,68 |
| 0,623 | 0,200 | 708 | 0,343 | 4,66 |
| 0,627 | 0,203 | 708 | 0,343 | 4,69 |
| 0,629 | 0,205 | 710 | 0,342 | 4,72 |
| 0,632 | 0,208 | 712 | 0,342 | 4,76 |
| 0,611 | 0,208 | 727 | 0,338 | 4,90 |
| 0,623 | 0,214 | 736 | 0,336 | 5,05 |
| 0,640 | 0,228 | 740 | 0,335 | 5,22 |
| 0,614 | 0,228 | 779 | 0,327 | 5,59 |
| 0,625 | 0,237 | 781 | 0,326 | 5,69 |
| 0,614 | 0,231 | 786 | 0,325 | 5,68 |
| | | | | **T20** |
| 0,630 | 0,150 | 602 | 0,359 | 3,12 |
| 0,628 | 0,160 | 623 | 0,350 | 3,43 |
| 0,631 | 0,175 | 649 | 0,340 | 3,83 |
| 0,630 | 0,185 | 668 | 0,333 | 4,11 |
| 0,631 | 0,188 | 673 | 0,330 | 4,19 |
| 0,632 | 0,211 | 713 | 0,314 | 4,80 |
| 0,630 | 0,218 | 729 | 0,308 | 5,01 |
| 0,628 | 0,218 | 732 | 0,307 | 5,03 |
| 0,628 | 0,248 | 788 | 0,284 | 5,84 |
| | | | | **T18** |
| 0,681 | 0,205 | 641 | 0,358 | 4,15 |
| 0,688 | 0,234 | 683 | 0,348 | 4,79 |
| 0,681 | 0,230 | 685 | 0,348 | 4,77 |
| 0,670 | 0,245 | 728 | 0,338 | 5,28 |
| 0,661 | 0,243 | 737 | 0,336 | 5,35 |

۱-جانشيني بيوتيت توسط ارتوپيروکسن. در اين نمونه (*JC1*) *Bt* هميشه توسط ارتوپيروکسن بلوکه و احاطه شده است که عدم وجود *Kfs* نشان دهنده انجام واکنش مجازي (مذاب گرانيتي) *Bt+Qtz = Opx+* مي‌باشد. ضمناً در اين سنگ‌ها لوکوسم مشاهده نمي شود. لذا چنين مي‌توان در نظر گرفت که نمونه *JC1* يک تفاله بوده که تحت شرايط *P* و *T* شديد متبلور شده است شکل (۳).

۲- جانشيني مجموعه *Grt+Kfs* توسط پاراژنز *Bt+Qtz+Sil* بر اساس واکنش *Grt+Kfs+H₂O* => *Bt₂+Sil₂+Qtz*.

٣- گسترش كومينگتونيت بين *Opx* و*Qtz* بر طبق واكنش *Opx+Qtz+$H_2O$ = Cum* .

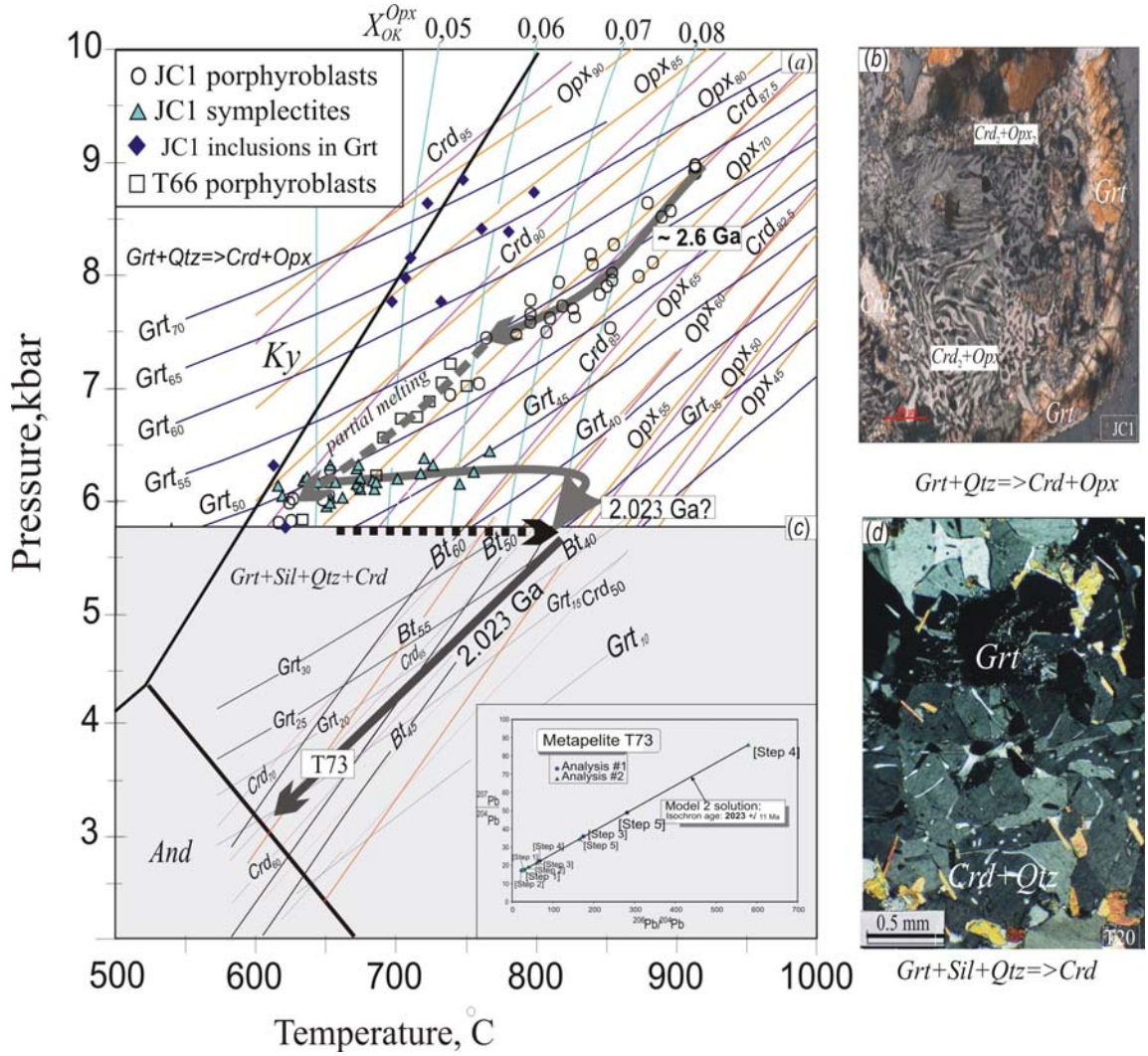
درسنگ هائي كه تحت تاثير پلي متامورفيزم قرار مي‌گيرند, بدليل اينكه آخرين فاز تقريباً تمامي آثار فازهاي قبلي را از بين مي‌برد وضعييت رويدادهاي اوليه *P-T* هميشه در هاله اي از ابهام مي‌باشد. خوشبختانه در تعدادي از سنگ‌هاي دگرشكل نشده ساختار باكليكرال مانند نمونه‌هاي *JC1* و*T66* شواهد مربوط به دگرشكلي و دگرگوني دوم حفظ شده و بافت‌هاي واكنشي *(1)* حاصل عملكرد فاز *D3/M3* ( تقريباً ٢ ميليارد سال )مي باشد. نمونه *JC1* كه از اين دسته ميباشد بصورت دقيق مطالعه شد. در اين نمونه مراحل تحولي زير ثبت و ضبط است: الف) اين سنگ مرزهاي رخساره اي را قطع نموده; ب) منطقه بندي سيستماتيک شيميائي دركانيهاي *Fe-Mg* دار اين سنگ نشانه اي بر كاهش پارامترهاي *P-T* مي‌باشد; ج) جانشيني بيوتيت توسط ارتوپيروكسن بيانگر ذوب بخشي و خروج مذاب گرانيتي از اين سنگ مي‌باشد(در اين سنگ لوكوسم وجود ندارد) ; د) توسعه بسيار خوب بافت‌هاي واكنشي (ج) بيانگر تآثير آخرين فاز دگرگوني در شكل گيري اين سنگ مي‌باشد. همه اين مشاهدات مي‌بايستي در روند *P-T* منعكس گردد زيرا با مراحل متفاوت و متعدد در تحول دگرگوني نمونه *JC1* مرتبط هستند. ما اقدام به محاسبه پارامترهاي *P-T* براي تعيين مرز بين رخساره‌هاي *Sil+Opx+Qtz* و *Crd+Grt* نموديم. اين پارامترها بين ٩٠٠ < *$T\,^oC$* < ٨٠٠ و ٩ < *P, kbar* <٨,٥ تغيير مي‌نمايند و بيانگر نقطه اوج دگرگوني در طي فرايند *D2/M2* ميباشد*(Tabatabaei manesh, 2006)*.

فشار ودما بر مبناي تغيير تركيب شيميائي كانيهاي *Fe-Mg* در واكنش دي واريانتي (٣) محاسبه گرديد. همچنين به همراه استفاده از داده‌هاي اين واكنش ، از ترمومترهاي (٤) و (٥) و واكنش‌هاي تبادلي *$Grt_{Mg} + Opx_{Fe} = Opx_{Mg} + Grt_{Fe}$* و *$Crd_{Mg} + Fo = Crd_{Fe} + En$* براي محاسبه بخش بالائي روند *P-T* در شكل (٤) استفاده گرديد جدول (٣) *(Tabatabaei manesh, 2006)*. در بخش پاييني روند *P-T* وبين درجه دماهاي ٦٧٥ و ٧٤٠ *$^oC$* يک بريدگي يا به عبارتي يک « گپ» (محلي كه نقاط ديده نمي شوند) وجود دارد. اين « گپ» بيانگر ذوب بخشي و تشكيل گرانيت‌هاي لوكوكرات مي‌باشد كه قبلاً به آن اشاره گرديد. اين فرضيه بر دو حادثه همزمان استوار است: (١) تشكيل گارنت‌هاي حاشيه اي بدون ادخال و (٢) جانشيني بيوتيت توسط ارتوپيروكسن. با استفاده ازتركيب اين سه نوع كاني و نتايج حاصل از ترمومترهاي *Opx-Grt* و *Bt-Grt* و با توجه به روند *P-T* در شكل (٤*a*) امكان دست يابي به پارامترهاي *P-T* كه در آن ذوب بخشي صورت گرفته به شرح ذيل ميسر گرديد:

| دما/فشار | *Bt-Grt* | *Opx-Grt* |
|---|---|---|
| *$T\,^oC$* | ٦٨٠ – ٧١٢ | ٧١٥ – ٧٣٠ |
| *P, kbar* | ٦,٣ – ٦,٦ | ٦,٦ – ٦,٨ |

ازديگر مشخصات جالب نمونه*JC1* جهت گيري خاص سيليمانيت در پورفيروبلاست‌هاي گارنت و ارتوپيروكسن در طي فاز دگرشكلي *D2* و در نقطه اوج دگرگوني مي‌باشد.

از مشخصات متاپليت‌هاي ساختار زمين شناسي باكليكرال وجود دو روند *P-T* در تحول دگرگوني آنها مي‌باشد (شكل٤) كه منعكس كننده تشكيل آنها در طي فاز *D2/M2* ( سنگ‌هاي دگرشكل نشده) و *D3/M3* (




شكل ۴- تركيب روندهاي **P-T** صعود گرانوليت‌هاي دگرشكل نشده و دگرشكل شده در زمانهاي متفاوت زمين شناسي ولي در ساختار واحد زمين شناسي باكليكرال و در فاصله ۱۰۰ متري از يكديگر. همان گونه كه در ديا‌گرام **a** مشخص است حداقل دما در روند **P-T** بالائي **(D2/M2)** با حداكثر فشار در روند **P-T** پسائيني **(D3/M3)** مطابقت دارد. اين بدان معنا ست كه دگرگوني سنگ‌ها در طي حادثه **D3/M3** به واسطه گداختگي همفشار **(IH)** به ميزان ۱۲۰ درجه سانتيگراد و در طي ۶۰۰ ميليون سال بعد از حادثه اول **D2/M2** و در محدوده رخساره گرانوليت صورت پذيرفته است. **b)** بافت كرونا كه تحت تآثير واكنش **Grt+Qtz→Opx+Crd** در متاپليت **JC1** ايجاد شده است ; **c)** روند **P-T** متاپليت **T73** ازساختار باكليكرال; **d)** تصوير ميكروسكپي از متاپليت **T20** كه نشان دهنده جانشيني كامل**($Crd_2$+Qtz)** به جاي مجموعه اوليه **($Grt_1$+Sil+Qtz)** بعنوان محصول واكنش **$Grt_1$+Sil+Qtz→$Crd_2$** در طي گداختگي هم فشار مي‌باشد. در ديا‌گرام سمت راست قسمت **(d)** منحني ايزوكرون بر اساس سن سنجي گارنت به روش سرب- سرب در نمونه **T73** نشان داده شده است. سن سنجي در نمونه **JC1** سنهاي متفاوتي را نشان ميدهد كه حاكي از تآثير فاز **D3/M3** بر اين سنگ‌ها مي‌باشد **(van Reenen et al., 2004 ; Tabatabaei manesh, 2006).**

جدول۳- پارامترهاي فشار ودماي تعادلات منطقه اي براي مجموعه **Grt+Opx+Qtz+Crd** در ۰،۲ = **aH2O**
در متاپليت **JC1** از ساختار باكليكرال

| *№ Grt* | $X_{Mg}^{Grt}$ | $X_{Ca}^{Grt}$ | *№ Crd* | $X_{Mg}^{Crd}$ | *№ Opx* | $X_{Mg}^{Opx}$ | $a_{Al}^{Opx}$ | *T (°C)** | *P (kbar)£* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *J-4C21* | *0,595* | *0,037* | *J-11A4* | *0,862* | *J- 12B1* | *0,742* | *0,048* | *889* | *8,43* |
| *J-4C21* | *0,589* | *0,04* | *J-11A5* | *0,872* | *J- 12B2* | *0,757* | *0,055* | *841* | *8,06* |
| *J-4C22* | *0,587* | *0,037* | *J-11A6* | *0,871* | *J- 12B3* | *0,749* | *0,058* | *839* | *8,13* |
| *J-4C23* | *0,577* | *0,039* | *J-11A7* | *0,879* | *J- 12B4* | *0,747* | *0,049* | *796* | *7,78* |
| *J-4C24* | *0,572* | *0,035* | *J-11A8* | *0,877* | *J- 12B5* | *0,75* | *0,049* | *796* | *7,67* |
| *J-4C27* | *0,567* | *0,037* | *J-11A9* | *0,87* | *J- 12B6* | *0,749* | *0,05* | *811* | *7,65* |
| *J-4C28* | *0,574* | *0,04* | *J-11A10* | *0,871* | *J- 12B7* | *0,752* | *0,049* | *818* | *7,74* |
| *J-4C29* | *0,56* | *0,037* | *J-11A11* | *0,861* | *J- 12B11* | *0,743* | *0,052* | *828* | *7,65* |
| *J-4C31* | *0,556* | *0,034* | *J-11A12* | *0,866* | *J- 12B12* | *0,746* | *0,056* | *808* | *7,53* |
| *J-4C32* | *0,562* | *0,036* | *J-11A13* | *0,863* | *J- 12B13* | *0,744* | *0,059* | *826* | *7,72* |
| *J-4C33* | *0,557* | *0,036* | *J-11A14* | *0,87* | *J- 12B14* | *0,737* | *0,056* | *797* | *7,61* |
| *J-4C34* | *0,545* | *0,04* | *J-11A15* | *0,868* | *J- 12B15* | *0,727* | *0,06* | *786* | *7,49* |
| | | | | | پورفيروبلاستها | | | | |
| *J-4A2* | *0,551* | *0,04* | *J-11A2* | *0,884* | *J-13A13* | *0,774* | *0,032* | *739* | *6,84* |
| *J-4A3* | *0,564* | *0,037* | *J-11A3* | *0,884* | *J-13A14* | *0,766* | *0,031* | *759* | *7,15* |
| *J-4A4* | *0,577* | *0,039* | *J-11A4* | *0,862* | *J-13A15* | *0,77* | *0,028* | *853* | *7,57* |
| *J-4A5* | *0,595* | *0,035* | *J-11A5* | *0,872* | *J-13A16* | *0,766* | *0,027* | *850* | *7,88* |
| *J-4A6* | *0,592* | *0,037* | *J-11A6* | *0,871* | *J-13A17* | *0,764* | *0,025* | *846* | *7,83* |
| *J-4A7* | *0,596* | *0,04* | *J-11A12* | *0,866* | *J-13A18* | *0,772* | *0,032* | *873* | *7,96* |
| *J-4A8* | *0,596* | *0,037* | *J-11A13* | *0,863* | *J-13A19* | *0,762* | *0,031* | *884* | *8,08* |
| *J-4A9* | *0,593* | *0,034* | *J-11A14* | *0,87* | *J-13A20* | *0,751* | *0,031* | *854* | *8,05* |
| *J-4A10* | *0,589* | *0,036* | *J-11A15* | *0,868* | *J-13A21* | *0,756* | *0,033* | *854* | *7,94* |
| *J-4A11* | *0,579* | *0,036* | *J-11A16* | *0,874* | *J-13A22* | *0,74* | *0,047* | *816* | *7,92* |
| *J-4A12* | *0,543* | *0,04* | *J-11A18* | *0,874* | *J-13A23* | *0,723* | *0,068* | *765* | *7,5* |
| | | | | | | | | | |
| *J-5B2* | *0,5* | *0,03* | *J-5B1* | *0,9* | *J-5B12* | *0,75* | *0,06* | *625* | *6,08* |
| *J-5B3* | *0,5* | *0,04* | *J-5B10* | *0,89* | *J-5B11* | *0,74* | *0,07* | *654* | *6,28* |
| *J-5B4* | *0,5* | *0,04* | *J-5B1* | *0,9* | *J-5B11* | *0,74* | *0,07* | *626* | *6,25* |
| *J-5B5* | *0,49* | *0,04* | *J-5B10* | *0,89* | *J-5B12* | *0,75* | *0,06* | *646* | *6* |
| *J-5B6* | *0,49* | *0,04* | *J-5B1* | *0,9* | *J-5B11* | *0,74* | *0,07* | *625* | *6,22* |
| *J-5B7* | *0,49* | *0,04* | *J-5B10* | *0,89* | *J-5B12* | *0,75* | *0,06* | *649* | *6,05* |
| *J-5B8* | *0,49* | *0,04* | *J-5B1* | *0,89* | *J-5B12* | *0,75* | *0,06* | *648* | *6,04* |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *J-5B9* | *0,49* | *0,04* | *J-5B10* | *0,9* | *J-5B11* | *0,74* | *0,07* | *616* | *6,08* |
| | | | | | سیمپلکتیتها | | | | |
| *5H-4* | *0,468* | *0,04* | *5I-1* | *0,886* | *5I-1* | *0,718* | *0,107* | *636* | *6,22* |
| *5H-4* | *0,468* | *0,04* | *5I-2* | *0,875* | *5I-2* | *0,717* | *0,075* | *662* | *6,04* |
| *5H-4* | *0,468* | *0,04* | *5I-3* | *0,9* | *5I-3* | *0,712* | *0,071* | *598* | *5,97* |
| *5H-4* | *0,468* | *0,04* | *5I-4* | *0,871* | *5I-4* | *0,703* | *0,073* | *672* | *6,16* |
| *5H-4* | *0,468* | *0,037* | *5H-1* | *0,886* | *5H-1* | *0,701* | *0,083* | *634* | *6,19* |
| *5H-4* | *0,468* | *0,037* | *5H-2* | *0,882* | *5H-2* | *0,709* | *0,089* | *644* | *6,18* |
| *5H-4* | *0,468* | *0,037* | *5H-3* | *0,88* | *5H-3* | *0,692* | *0,067* | *651* | *6,18* |
| *5H-4* | *0,468* | *0,037* | *5H-4* | *0,87* | *5H-4* | *0,703* | *0,065* | *674* | *6,11* |
| *5J-4* | *0,468* | *0,038* | *5J-1* | *0,878* | *5J-1* | *0,709* | *0,06* | *653* | *5,99* |
| *5J-4* | *0,468* | *0,038* | *5J-2* | *0,879* | *5J-2* | *0,698* | *0,073* | *652* | *6,18* |
| *5J-4* | *0,468* | *0,038* | *5J-3* | *0,867* | *5J-3* | *0,702* | *0,073* | *684* | *6,19* |
| *5J-4* | *0,468* | *0,038* | *5J-4* | *0,86* | *5J-4* | *0,704* | *0,073* | *701* | *6,21* |
| *5G-6* | *0,472* | *0,039* | *5G-1* | *0,881* | *5G-1* | *0,698* | *0,087* | *653* | *6,34* |
| *5G-6* | *0,472* | *0,039* | *5G-2* | *0,867* | *5G-2* | *0,717* | *0,079* | *687* | *6,17* |
| *5G-6* | *0,472* | *0,039* | *5G-3* | *0,872* | *5G-3* | *0,714* | *0,081* | *675* | *6,2* |
| *5G-6* | *0,472* | *0,039* | *5G-4* | *0,854* | *5G-4* | *0,703* | *0,081* | *720* | *6,38* |
| *5G-6* | *0,472* | *0,039* | *5G-5* | *0,873* | *5G-5* | *0,704* | *0,089* | *674* | *6,34* |
| *5C-6* | *0,457* | *0,038* | *5C-1* | *0,872* | *5C-1* | *0,725* | *0,132* | *657* | *6,18* |
| *5C-6* | *0,457* | *0,038* | *5C-2* | *0,874* | *5C-2* | *0,706* | *0,083* | *651* | *5,96* |
| *5C-6* | *0,457* | *0,038* | *5C-3* | *0,878* | *5C-3* | *0,697* | *0,095* | *643* | *6,11* |
| *5C-6* | *0,457* | *0,038* | *5C-4* | *0,86* | *5C-4* | *0,698* | *0,087* | *685* | *6,11* |
| *5D-6* | *0,457* | *0,038* | *5D-1* | *0,844* | *5D-1* | *0,713* | *0,121* | *726* | *6,33* |
| *5D-6* | *0,457* | *0,038* | *5D-2* | *0,888* | *5D-2* | *0,707* | *0,103* | *619* | *6,05* |
| *5D-6* | *0,457* | *0,038* | *5D-3* | *0,873* | *5D-3* | *0,699* | *0,084* | *653* | *6,04* |
| *5D-6* | *0,457* | *0,038* | *5D-4* | *0,874* | *5D-4* | *0,703* | *0,088* | *652* | *6,02* |
| *5D-6* | *0,457* | *0,038* | *5D-5* | *0,866* | *5D-5* | *0,696* | *0,112* | *672* | *6,3* |

* دما بر اساس واکنش ٤ و فشاربر اساس واکنش ١ محاسبه گردید

٤ فشار بر اساس واکنش ٢ محاسبه گردید

سنگ‌هاي دگرشكل شده) مي‌باشد. با توجه بـه رونـدهاي مذكور بـه خـوبي مـي‌تـوان فهميـد كـه عبـور از مرحلـه دگرگوني و دگرشـكلي ***D2/M2*** (۲,٦ ميليـارد سـال ) بـه سيكل ***D3/M3*** (۲ ميليارد سـال ) از طريـق گـداختگي در فشار ثابت ***(IH)*** و بدون تاثير حادثه ژئوديناميكي خاصـي صورت مي‌پذيرد ( روند افقـي در شـكل ٤ ). ايـن نتيجـه گيري منطبـق اسـت بـا نتـايج سـاختاري و سـن سـنجي ايزوتوپي نمونه‌هاي مـورد مطالعـه ***(Kröner et al., 1999; Boshoff et al., 2004)***. در منطقـه بـاكليكرال تمـامي نمونـه‌هـاي بـا سـن ۲ ميليـارد سـال سـاخت‌هـاي بلاسـتوميلونيتي از خـود نـشان مـي‌دهنـد. ايـن مطلـب بيانگرآن است كه تكرار دگرگوني درجه بالا در سنگ‌هاي گرانوليتي تحت تاثير يک واقعه تكتونيكي صورت پذيرفته اسـت كـه نمـود آن در تـشكيل زونهـاي پلاسـتيكي بـا ضخامت‌هاي ميكروني تا صدها متـر هويـدا مـي‌باشـد. از طرف ديگر چنين تصور مي‌گردد كه ايجـاد اصـطكاک در اين زونها وسپس اثر سيالات سرمنشآ توليد گرمايي بـوده كه نهايتآ منجر به دگرگوني بعدي پس از گذشت حدود شناسي مشخص مي‌گردد كه عبارتند از:

الف) چين‌هاي غلافي نئوآركئن به سن(۲,۶ ميليارد سـال) وهمچنين چين‌هاي با محور تقريبآ قائم كه در طي فرايند ***(D2/M2)*** تـشكيل شـده انـد و ب) چـين‌هـاي عرضـي پروتروزوئيـک آغـازي (۲ ميليـارد سـال ) ***(D3/M3)*** كـه چينهاي ***D2/M2*** راقطع مي‌نمايند . داده‌هاي پترلـوژيكي از گنيس‌هاي زون مركزي نشان دهنـده رونـد سـرد شـدگي همراه با كاهش فشار***(DC)*** در تحول اين سنگ‌هـا در طـي فرايند ***D۲/M۲*** مي‌باشد. اين سنگ‌هـا سـپس مجـدداً طـي مرحله ي دگرشكلي پلاستيكي (***D۳***) و در مرحلـه بعـد از نقطه اوج، دگرگون (***M3***) شده وكاني‌هاي جديدي در آنها رشد نموده اند. طي اين مطالعه ثابـت گرديـد كـه تكـرار دگرگـوني در شـرايط رخـساره ي گرانوليـت بواسـطه ي گـداخت در فـشار ثابـت ( ***Isobaric Heating -IH***) در بخش مياني پوسـته پركـامبرين اتفـاق افتـاده اسـت. ايـن گداختگي در اثـر عمـل شـيرزون‌هـا بـا ابعـادي از چنـد ميكرون تا چندين متر وتـاثير سـيالات داغ كـه بـه عنـوان كاتاليزور در حركت بعدي گرانوليت‌ها از بخش‌هاي مياني پوسته به سمت بالا مـوثر بـوده انـد اتفـاق افتـاده اسـت. فراوانـي و همچنـين ابعـاد ظريـف ايـن شـيرزون‌هـا درگداختگي سريع اين سنگ‌ها نقش اساسي داشته اسـت. در اثر اين گداختگي در بعضي از قسمت‌هـا مجموعـه ي گارنـت + سـيليمانيت + كـوارتز بـصورت كامـل توسـط كرديريت جايگزين مي‌گـردد . در مكانهـائي كـه تـآثيراين دگرشكلي شديد است آثار دگرگوني‌هـاي قبلـي كـاملآ از بين رفته و سن‌هاي ايزوتوپي جديدي تشكيل مي‌شود. لذا براي كمپلكسهاي پلي متامورف شده عـلاوه بـر شـناخت ساختار زمين شناسي، ضرورت دارد به شكل و پيكربنـدي رونـدهاي ***P-T*** نيـز توجـه كامـل نمـود. در همـاهنگي بـا داده‌هاي ايزوتوپي ايـن شـواهد وايـن روش اجـازه آن را خواهد داد كه نه تنها طبيعـت پلـي متـامورفيزم مـشخص گردد بلكه چگونگي بالا آمدن آنها تا سطح نيز بيان شـود.

اگراين كمپلكس‌ها در بخش‌هاي مياني پوسته قرار گيرند و امكاني براي بالا آمدن آنها وجود نداشته باشد فشار مينيمم $P_{min}$ براي اولين رويداد دگرگوني تقريبا معادل فشارحداكثر $P_{max}$ براي دگرگوني دوم مي‌باشد و اين در حاليست كه دما در دگرگوني دوم به مراتب بيشتر از دما در دگرگوني اول است $T_2 >> T_1$. در اين دياگرامها اين دوروند تقريبا به موازات يكديگر بوده و توسط روند گداخت در فشار ثابت (*IH*) به يكديگر متصل مي‌شوند. سنگ‌هاي گرانوليتي زون مركزي ليمپاپودر تحول پترلوژيكي خود نشان دهنده چنين روندي از ***P-T*** (***Trend***) مي‌باشند.

نكته ي اساسي بدست آمده در اين مطالعه آن است كه در طي پلي متامورفيزم زون مركزي حادثه ي گداخت در فشار ثابت (*IH*) رخ داده و با توجه به مطالعه ي كاني شناسي و تعادل كانيايي مي‌توان با استخراج روند ***Z*** گونه تحولي سنگ‌ها به تاريخچه ي پلي متامورفيكي آنها پي برد. اين نتيجه گيري از آن جهت قابل توجه است كه در سرزمين‌هاي پلي متا مورفي آخرين رويداد دگرگوني شواهد دگرگوني‌هاي ماقبل خود را از بين برده و مطالعات ايزوتوپي نيز در اين موارد كار گشا نمي باشد وتنها با اين روش است كه مي‌توان فاز دگرشكلي – دگرگوني اول را از دومي تشخيص داد.

## منابع


1- R., Boshoff, D.D., van Reenen, C.A., Smit, R.A., Armstrong, L.L., Perchuk, J., Kramers, Formation of major fold types during distinct geological events in the Central Zone of the Limpopo Belt, South Africa: new structural, metamorphic and geochronologic data // S.A. Geocongress, Abstracts. P. 76-77; (2004).

2- A., Kröner, P., Jaeckel, G., Brandl, A. A. Nemchin, & R. T., Pidgeon, Single zircon ages for granitoid gneisses in the Central Zone of the Limpopo Belt, southern Africa, and geodynamic significance. Precambrian Research . 93. P.299-337; (1999).

3- L.L., Perchuk, Configuration of P-T trends as a record of high-temperature polymetamorphism // Doklady Earth Sciences. V. 401. No 2. P. 311–314; (2005).

4- L. L., Perchuk, Thermodynamic control of metamorphic processes. In: Saxena, S.K. & Bhattacharj, S. (eds). Energetics of Geological Processes. NewYork. Springer Verlag. P. 285-352; (1977).

5- L. L., Perchuk, T. V., Gerya, D. D., Van Reenen, O. G., Safonov, & C. A., Smit, The Limpopo metamorphic complex, South Africa: 2.Decompression/cooling regimes of granulites and adjusted rocks of the Kaapvaal craton. Petrology 4. P. 571-599; (1996).

6- L.L., Perchuk, Thermodynamic regime of deep-seated petrogenesis. Moscow. Nauka Press, 114p; (1973).

7- M., Schaller, O., Steiner, I., Studer, L., Hozer, M., Herweg, J.D., Kramers, Exhumation of Limpopo Central Zone granulites and dextral continent-scale transcurrent movement at 2.0 Ga along the Palala Shear Zone, Northern Province, South Africa. Precambrian Research. 96 . P. 263-298; (1999).

8- S .M., Tabatabaei manesh, Petrology of garnet – orthopyroxene - cordierite crown structures formation in metapelites from the north zone of the Limpopo high - grade terrain, South Africa. Vectnik. 4. 4. P. 32-38; (2005).

9- S. M., Tabatabaei manesh, Hypersthene-sillimanite paragenes in Aldan shield (Russia) and complex of Limpopo (South Africa). Vectnik. 4. 5. P. 41-52; (2005).

10- S. M., Tabatabaei manesh, Petrology of a polymetamorphic rocks in the central zone of the Limpopo high - grade terrain, South Africa. Ph.D. Thesis. Moscow State University. 184p. (in Russian); (2006).

11- D. D., van Reenen, L. L., Perchuk, C. A., Smit, D. A., Varlamov, R ., T. V, Boshoff, J. M., Huizenga, & T. V., Gerya, Structural and P-T Evolution of a Major Cross Fold in the Central Zone of the Limpopo High-Grade Terrain, South Africa. Journal of Petrology. 45. P. 1413-1439; (2004).