

تحلیل‌های شریتمیکرز در سیستم‌های حاوی بیش از یک نقطه بدون تغییر با ارایه یک روش عملی از نوار دگرگونی فشاربالا-دما پایین سانباگاوا واقع در جنوب‌غربی ژاپن

جواد ایزدی‌پار

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
(دریافت: ۷۸/۲/۲۰؛ پذیرش: ۷۹/۵/۴)

چکیده

شبکه‌های پتروژنتیکی که حاصل تحلیل‌های شریتمیکرز سیستم‌های حاوی بیش از یک نقطه بدون تغییر است دارای اهمیت زیادی در پتروژنتیک سرزمین‌های دگرگونی می‌باشند. در این مقاله، دگرگونی متبازیت‌ها در شرایط دگرگونی درجه پایین نوار دگرگونی فشار بالای سانباگاوا به عنوان یک سیستم ترمودینامیکی در نظر گرفته شده است که شامل فازهای لوسونیت، پمپئولیت، اپیدوت، گلوکوفان، اکتینولیت، کلریت، پیروکسن سدیک همراه با فازهای اضافی کوارتز، آلبیت و آب می‌باشد. تما می فازهای تشکیل دهنده سیستم را می‌توان با ۳ سازنده کاذب ACF بوجود آورد. در این سیستم ۲۱ نقطه بدون تغییر و ۳۵ منحنی یک متغیره وجود دارد. در این مقاله پیشنهاد شده است که شیب منحنی‌های یک متغیره محاسبه شود تا تعداد آرایش هندسی در اطراف هر نقطه بدون تغییر به نصف کاهش یابد. جهت ساخت شبکه پتروژنتیکی روشی مطرح گردیده که بنام مدار نقاط بدون تغییر نامگذاری شده است که شامل نقاط بدون تغییر و منحنی‌های یک متغیره هم‌نوع رابط می‌باشد. نقاط بدون تغییر درون جریانی در بالاترین و نقاط بدون تغییر برون جریانی در پایین‌ترین فشار ممکن در شبکه پتروژنتیکی قرار می‌گیرند. یک شبکه پتروژنتیکی از یک نقطه برون جریانی شروع و به یک نقطه درون جریانی خاتمه می‌یابد. در این سیستم هفت مجموعه از نقاط بدون تغییر حاصل می‌شود که با ترسیم هر مجموعه در نمودار فشار-دما هفت شبکه پتروژنتیکی حاصل می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: نظریه شریتمیکرز، شبکه پتروژنتیک، نوار دگرگونی سانباگاوا، متبازیت، منحنی‌های یک متغیره، نقاط بدون تغییر، نمودارهای فشار-دما.

مقدمه

نظریه شرینمیکرز (Schreinemakers) جهت تعیین ارتباطات سیستماتیک تعادل‌های یک متغیره (Univariant equilibria) در نمودارهای دما - فشار بکار برده می‌شود. با این نظریه می‌توان با استفاده از اطلاعات محدود، ارتباطات میان فازهای تشکیل‌دهنده سیستم را در قالب منحنیهای یک‌متغیره (Invariant curves) و نواحی دومتغیره (Bivariant regions) در یک نمودار فشار - دما تعیین نمود. موقعیت قرارگیری منحنیهای یک متغیره در اطراف یک نقطه بدون تغییر در نظریه شرینمیکرز با استفاده از اصول پایه زیر تعیین می‌گردد (Zen, 1966 & 1967; Zen and Roseboom, 1972):

Bunding theorem - ۱

Morey - Schrienemakers theorem - ۲

Overlap theorem - ۳

Principle of opposition - ۴

نظریه شرینمیکرز توانایی محاسبه شیب منحنی‌های یک متغیره را ندارد ولی اینکار با استفاده از یکسری فرضیات انجام شدنی است. کاربرد این اصول در یک سیستم ترمودینامیک در حال تعادل که تعداد سازنده‌های سیستم به علاوه متغیرهای فشار و دما برابر مجموع فازهای موجود در سیستم باشند چندان پیچیده نیست زیرا در این حالت تنها یک نقطه بدون تغییر وجود خواهد داشت که تمام فازها در آن با یکدیگر همزیست می‌باشند. هرچند که تعیین بسیار دقیق ارتباطات فازی نیازمند مطالعات تجربی آزمایشگاهی است. درحالیکه بسیاری از سیستمهای با اهمیت و شاید قریب به اتفاق تمام سیستمهای طبیعی در دگرگونی شامل بیش از یک نقطه بدون تغییر می‌باشند. به‌عنوان مثال برای یک سیستم تک‌سازنده‌ای که از هفت فاز تشکیل شده است تعداد نقاط بدون تغییر ۳۵ می‌باشد. ارتباط میان نقاط بدون تغییر در یک نمودار فشار - دما بنام شبکه پتروژنتیکی (Petrogenetic grid) معروف است که دارای اهمیت بسیار زیادی در تحلیلهای نواحی دگرگونی و حرکات تکتونیکی می‌باشد. اما به دلیل پیچیدگیهای زیاد، ساختن چنین سیستمهایی کمتر مورد بحث پترولوژیست‌های دگرگونی واقع شده است. اولین کوششها در این زمینه توسط کورژینسکی (Korzhinsky, 1959) انجام شد. کورژینسکی یک سیستم دمای متشکل از سه سازنده و هفت فاز را در نظر گرفت و نشان داد که سه نقطه بدون تغییر مستقل می‌توانند توسط یک منحنی یک متغیره به یکدیگر متصل شوند ولی هر سه نقطه بدون تغییر در یک زمان پایدار نیستند. اصولی که کورژینسکی پایه گذاری نمود امروزه پایه نظری مطمئنی جهت ساخت شبکه پترو ژنتیکی محسوب می‌شود ولی

کاربرد آنها در مطالعات عملی سرزمینهای دگرگونی بسیار پیچیده است. هیراجیما نیز (Hirajima, 1983) در مقاله‌ای به زبان ژاپنی روشی را برای ساخت شبکه پتروژنتیکی مطرح نمود که کمتر مورد استفاده پژوهشگران غیر ژاپنی قرار گرفته است. در این مقاله سعی شده است که با استفاده از نتایج مطالعات قبلی روش ساده‌ای جهت کاربرد اصول کورژینسکی برای تعیین ارتباط میان نقاط بدون تغییر در نمودارهای دما - فشار ارائه گردد. جهت این بحث از نتایج تحقیقات در مورد نوار دگرگونی سانباگاوا (Sanbagawa) به عنوان یک سیستم ترمودینامیکی فشار بالا - دمای پایین واقع در جنوب‌غربی ژاپن استفاده شده است.

سازنده‌ها و فازهای تشکیل دهنده سیستم

جهت تعیین سازنده‌ها و فازهای تشکیل دهنده سیستم، دگرگونی متابازیتها را در شرایط دگرگونی درجه پایین نوار دگرگونی فشار بالای سانباگاوا به عنوان یک سیستم ترمودینامیکی در نظر می‌گیریم. نوار سانباگاوا یک نوار دگرگونی فشار بالا - دمای پایین متعلق به کرتاسه واقع در جنوب‌غربی ژاپن می‌باشد. بخش عمده نوار سانباگاوا از پلیت همراه با میان لایه‌های از مواد متنوع اقیانوسی تشکیل شده است که در بالاترین درجه در شیکوکوی مرکزی توسط قطعات تکتونیکی مافیک و اولترامافیک همراهی می‌شود (Wallis *et al.*, 1992).

در شیکوکوی مرکزی که نوار سانباگاوا بیشترین رخنمون را دارد براساس ظهور کانیهای شاخص دگرگونی، شیستهای پلیتی به چهار منطقه دگرگونی تقسیم شده‌اند که عبارتند از: کلریت، گارنت، آلبیت - بیوتیت و الیگوکلاز - بیوتیت (Higashino, 1975 & 1990) Enami, 1983; Banno & Sakai, 1989). شرایط دما و فشار از 300°C - 205 - 6 Kbar و 5 از منطقه کلریت شروع و به 610°C و 10 Kbar در منطقه الیگوکلاز - بیوتیت خاتمه می‌یابد (Banno & Sakai, 1989; Wallis & Banno, 1990).

معمولاً فازهای لائوسونیت، پمپلایت، اپیدوت، گلوکوفان، اکتینولیت، کلریت و پیروکسن سدیک در درجات پایین متابازیتها در نوارهای دگرگونی گلوکوفانی دیده می‌شوند. فازهای اضافی را کوارتز، آلبیت و آب تشکیل می‌دهند (Frey *et al.*, 1991). تمامی فازهای تشکیل دهنده سیستم را می‌توان با ۳ سازنده کاذب زیر بوجود آورد با این فرض که کوارتز و آب فازهای اضافی باشند.



در جدول شماره ۱ نامهای اختصاری، فرمولهای شیمیایی و حجمهای مولی فازهای تشکیل دهنده سیستم نشان داده شده‌اند و در شکل شماره ۱ هفت فاز تشکیل دهنده با توجه به

سازنده‌های آنها ترسیم شده‌اند. عموماً نامهای اختصاری از کترت‌گرفته شده مگر در مواردی که اشاره شده است (Kretz, 1983).

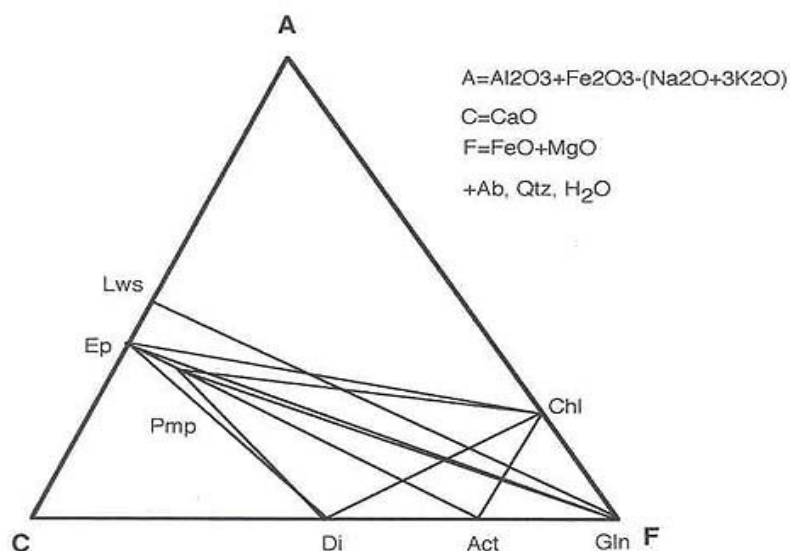
جدول ۱- نامهای اختصاری، فرمولهای شیمیایی و حجم مولی فازهای تشکیل دهنده سیستم.

M.V. حجم مولی فازها بر حسب کالری / مول و Abb. نامهای اختصاری فازها (Kretz, 1983)

داده‌های ترمودینامیکی از منابع زیر گرفته شده‌اند:

(Robie *et al.*, 1978; powell and Holland, 1988; Burnham *et al.*, 1969)

Mineral	Abb.	Formula	M.V.
Lawsonite	Lws	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ 2H ₂ O	101.30
Glaucothane	Gln	Na ₂ Mg ₃ Al ₂ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	259.70
Epidote	Ep	Ca ₂ Al ₃ Si ₃ O ₁₂ (OH)	136.40
Diopside	Di	CaMgSi ₂ O ₆	66.10
Pumpellyite	Pmp	Ca ₄ MgAl ₅ Si ₆ O ₂₃ (OH) ₃ 2H ₂ O	295.60
Actinolite	Act	Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	272.90
Chlorite	Chl	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈	210.00
Quartz	Qtz	SiO ₂	22.70
Albite	Ab	NaAlSi ₃ O ₈	100.10
Water	H ₂ O	H ₂ O	19.80



شکل ۱- هفت فاز تشکیل دهنده سیستم با توجه به سه سازنده A, C, F. آلبيت و کوارتز و آب به عنوان فازهای اضافی در نظر گرفته شده‌اند.

برای کانیهایی که جانشینیهایی از نوع Fe^{2+} -Mg و Fe^{3+} -Al در ترکیب محلول جامد دارند، اعضاء نهایی Mg و Al استفاده شده‌اند. نسبت Al/Si کلریت مورد استفاده برابر با ۲/۳ فرض شده است که با تجزیه شیمیایی کلریت‌های منطقه کانتو واقع در نوار سانباگوا مطابقت دارد (Hirajima, 1983). همچنین در این مدل، پیروکسن سدیک همراه با آلبیت، دیوپسید فرض شده است. سیستم مورد بحث را می‌توان از شرایط ترمودینامیک ۳ Kbar و $300^{\circ}C$ الی ۱۰ Kbar و $500^{\circ}C$ بکار برد چرا که در این مدل فرض شده است که آلبیت و کوارتز به عنوان فازهای اضافی پایدار می‌باشند و فازهایی از قبیل گارنت، باروسیت، هورنبلند، زئولیت و پرهنیت در نظر گرفته نشده‌اند (Black, 1977; Brown, 1977a; Frey et al., 1991).

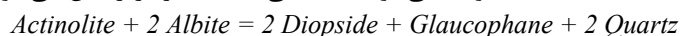
روش تعیین شبکه پتروژنتیکی

برای ایجاد نقطه بدون تغییر یک سیستم سه سازنده‌ای در نمودار فشار - دما ۵ فاز و برای تشکیل یک منحنی یک متغیره ۴ فاز ضروری است. با توجه به اینکه سیستم مورد بحث حاوی هفت فاز است لذا مجموعاً ۲۱ نقطه بدون تغییر وجود دارد که با یک نام و شماره اختصاری در جدول شماره ۲ نشان داده شده‌اند. در این جدول تعداد واکنشهای یک متغیره ۵ عدد و در مورد انواع تنزل یافته ۴ عدد می‌باشد. هر نقطه بدون تغییر علاوه بر نامهای اختصاری فازهای غایب در آن نقطه برای راحتی بحث با یک شماره نیز نشان داده شده است.

جدول ۲ - نقاط بدون تغییر و واکنشهای یک متغیره که از هر یک منشاء می‌گیرند.

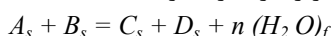
Invariant Point	Reaction Lines				
[1][Lws, Gln]	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5
[2][Ep, Gln]	R-1	R-6	R-7	R-8	R-9
[3][Di, Gln]	R-2	R-6	R-10	R-11	R-12
[4][Pmp, Gln]	R-3	R-7	R-10	R-13	R-14
[5][Act, Gln]	R-4	R-8	R-11	R-13	R-15
[6][Chl, Gln]	R-5	R-9	R-12	R-14	R-15
[7][Ep, Lws]	R-1	R-16	R-17	R-18	
[8][Di, Lws]	R-2	R-16	R-19	R-20	R-21
[9][Pmp, Lws]	R-3	R-17	R-19	R-22	
[10][Act, Lws]	R-4	R-18	R-20	R-22	R-23
[11][Chl, Lws]	R-5	R-17	R-21	R-23	
[12][Di, Ep]	R-6	R-16	R-24	R-25	R-26
[13][Pmp, Ep]	R-7	R-17	R-24	R-27	
[14][Act, Ep]	R-8	R-18	R-25	R-27	R-28
[15][Chl, Ep]	R-9	R-17	R-26	R-28	
[16][Pmp, Di]	R-10	R-19	R-24	R-29	R-30
[17][Act, Di]	R-11	R-20	R-25	R-29	R-31
[18][Chl, Di]	R-12	R-21	R-26	R-30	R-31
[19][Act, Pmp]	R-13	R-22	R-27	R-29	R-32
[20][Chl, Pmp]	R-14	R-17	R-30	R-32	
[21][Chl, Act]	R-15	R-23	R-28	R-31	R-32

بر اساس نظریه شریمنیکرز فازهای نشان داده شده در داخل گروه فازهای هستند که در نقطه بدون تغییر وجود ندارند. در حالت کلی برای هفت فاز و سه سازنده موجود در سیستم مورد بحث ۳۵ منحنی یک متغیره وجود خواهد داشت اما از آنجا که گلوکوفان، اکتینولیت و دیوپسید بر روی ضلع CF قرار گرفته‌اند لذا چهار مجموعه یک متغیره که آنها را در برمی‌گیرند دچار تنزل (Degeneracy) شده و همگی توسط منحنی یک متغیره زیر بیان می‌شوند:



بنابر این در این سیستم تعداد منحنیهای یک متغیره از ۳۵ به ۳۲ عدد کاهش می‌یابد. ۳۲ مجموعه غیر وابسته یک متغیره و ۳۲ واکنش مرتبط دهنده فازهای موجود در هر یک از مجموعه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. در نظریه شریمنیکرز شیب منحنیهای یک متغیره در نظر گرفته نشده است لذا آرایش هندسی منحنیهای یک متغیره در اطراف هر نقطه بدون تغییر توسط قاعده موری - شریمنیکرز انجام می‌شود. مطابق این روش دو آرایش هندسی امکان پذیر است که دارای تقارن آینه‌ای می‌باشند (e.g. Zen, 1966 and 1967). اما در بسیار از سیستمهای طبیعی در دگرگونی محاسبه شیب منحنیهای یک متغیره هر چند بطور نسبی امری کاملاً ضروری است. موقعیت فشار - دما تعداد زیادی از منحنیهای یک متغیره به طریق آزمایشگاهی تعیین شده‌اند و در حال حاضر برنامه‌های کامپیوتری نیز وجود دارند که موقعیت فشار - دما واکنشها را تعیین می‌کنند ولی در فقدان روشهای فوق شیب تمامی منحنیهای یک متغیره با کاربرد روش ارایه شده زیر براحتی قابل محاسبه خواهد بود (Hirajima, 1983).

بعنوان مثال واکنش آزادی زیر را در نظر بگیرید:



در این واکنش s نمایانگر فاز جامد و f نماینده فاز سیال است که در شرایط دگرگونی سانباگاوا می‌توان آنرا معادل آب خالص در نظر گرفت (Ernst, 1972). شیب واکنش فوق توسط معادله زیر قابل محاسبه است:

$$(dp/dT)_{G=0} = \Delta S / \Delta V_S + n(H_2O)V_{H_2O}(dp_{H_2O}/dp_S)$$

در این فرمول p_S ، ΔV_S و ΔS نمایانگر فشار، تغییرات حجم و تغییرات انترپی فاز جامد می‌باشند، V_{H_2O} نمایانگر حجم مولی آب و $n(H_2O)$ نمایانگر تعداد مولهای H_2O است که در واکنش نشان داده شده‌اند. با فرض اینکه $p_S = p_{H_2O}$ باشد فرمول فوق بصورت زیر اصلاح

$$(dp/dT)_{G=0} = \Delta S / \Delta V_S + n(H_2O)V_{H_2O} \quad \text{می‌شود:}$$

در شرایط دمایی 350°C و فشار $3/5$ Kbar انتخاب شده است.

آنتروپی فازهای سیلیکاته را می‌توان برابر مجموع آنتروپی‌های اکسیدهای تشکیل دهنده در نظر گرفت (Fyfe *et al.*, 1958). تغییر در آنتروپی یک واکنش آبزدا (ΔS) تقریباً معادل است با آنتروپی H_2O در فاز سیال منهای آنتروپی H_2O در فاز جامد. بنابراین ΔS در شرایط دمایی 350°C و فشار $3/5\text{Kbar}$ حدود $12\text{ cal/mol. }^\circ\text{C}$ تخمین زده میشود (Fyfe *et al.*, 1958). شبیه‌های مذکور در جدول ۳ بطریق فوق محاسبه شده‌اند. در این مدل سیستم ترکیب شیمیایی فازها ثابت فرض گرفته شده است (جدول ۱). لذا تغییر در شیب منحنیها بواسطه تغییر در ΔS و ΔV قابل نظر کردن می‌باشد. به همین خاطر می‌توان به جای منحنی‌ها، از خطوط یک‌متغیره در نمودار فشار - دما بحث کرد. همچنین معمولاً منحنی واکنش جامد - جامد در نمودار فشار - دما خط مستقیمی است که دارای کمی شیب مثبت است اما در این مقاله بصورت خطوط موازی محور دما در نظر گرفته شده است چرا که ΔS و ΔV واکنش جامد - جامد برابر صفر فرض شده است. در سیستم نمونه مورد بحث هر سه نقطه غیر وابسته بدون تغییر توسط منحنی یک‌متغیره غیرتنزل یافته به یکدیگر متصل می‌شوند ولی هر سه نقطه بدون تغییر در یک زمان پایدار نیستند (Korzhinsky, 1959). بین منحنی یک‌متغیره و نقاط بدون تغییر دو حالت زیر امکان پذیر است:

الف) جهت خروج منحنی یک‌متغیره بین هر سه نقطه بدون تغییر در یک جهت باشد (حالت a در شکل ۲).

ب) جهت خروج منحنی یک‌متغیره بین دو نقطه بدون تغییر، هم‌جهت ولی در جهت مخالف با نقطه بدون تغییر سوم می‌باشد (حالات c, d, e در شکل ۲).

در حالت الف فقط یک نقطه بدون تغییر پایدار است و بخش پایدار منحنی یک‌متغیره نیز بخشی است که از همین نقطه خارج شده است. در حالت ب دو تا از نقاط بدون تغییر پایدار خواهند بود و بخش پایدار منحنی یک‌متغیره نیز بخشی است که بین دو نقطه پایدار قرار گرفته است. تمام حالات متعدد ارتباط میان نقاط بدون تغییر بر روی منحنی یک‌متغیره در شکل ۲ نشان داده شده است. حالت الف بنام ارتباط غیر هم‌نوع (Homotypical) و حالت ب بنام ارتباط هم‌نوع (Homotypical) توسط کورژینسکی تعریف شده‌اند (Korzhinsky, 1959). ارتباطات غیر هم‌نوع بر روی هر منحنی یک‌متغیره در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. در میان نقاط هم‌نوع، نقطه‌ای که در سمت چپ قرار دارد نمایانگر سمت فشار پایین و اگر $dp/dT = 0$ نمایانگر سمت دمای پایین می‌باشد.

$$a) \quad \frac{\angle}{[A]} \quad \frac{\angle}{[B]} \quad \frac{\angle}{[C]}$$

$$b) \quad \frac{\rightarrow}{[A]} \quad \frac{\angle}{[B]} \quad \frac{\angle}{[C]}$$

$$c) \quad \frac{\rightarrow}{[A]} \quad \frac{\angle}{[C]} \quad \frac{\angle}{[B]}$$

$$d) \quad \frac{\rightarrow}{[A]} \quad \frac{\rightarrow}{[B]} \quad \frac{\angle}{[C]}$$

$$e) \quad \frac{\rightarrow}{[B]} \quad \frac{\rightarrow}{[A]} \quad \frac{\angle}{[C]}$$

شکل ۲- نمایش انواع ارتباطات هم‌منوع و غیرهم‌منوع بین سه نقطه بدون تغییر فرضی [A], [B], [C]. خط پیوسته نشان دهنده بخش پایدار منحنی یک متغیره رابط بین بدون تغییر می‌باشد و علامت پیکان نمایانگر جهت خروج منحنی یک متغیره از هر نقطه بدون تغییر می‌باشد.

در نظریه شریمنیکرز تنها از منحنیهای یک متغیره هم‌منوع جهت مرتبط کردن نقاط بدون تغییر می‌توان استفاده نمود. لذا تمام مجموعه‌های ممکن از نقاط بدون تغییر را که شبکه پتروژنتیک را تشکیل می‌دهند می‌توان با ارتباط دادن نقاط بدون تغییر از طریق منحنیهای یک متغیره هم‌منوع بدست آورد. وقتی تعداد نقاط بدون تغییر زیاد باشد یافتن چنین ارتباطی با تکیه بر اصول ترمودینامیکی مطروح در نظریه شریمنیکرز کار بسیار مشکلی است لذا روش زیر که ایده اولیه آن از مدارهای الکترونیکی گرفته شده است پیشنهاد گردیده و به نام مدار نقاط بدون تغییر نامگذاری شده است (Hirajima, 1983). مدار نقاط بدون تغییر مجموعه‌ای از نقاط بدون تغییر به عنوان اجزا الکترونیکی و منحنیهای رابط یک متغیره هم‌منوع بعنوان مدارهای رابط می‌باشد. دو مجموعه متفاوت از نقاط بدون تغییر در یک ارتباط هم‌منوع بر روی یک منحنی یک متغیره امکان پذیر است. تمام حالات ممکن از مجموعه نقاط بدون تغییر در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. خط رابط در اصل همان منحنی یک متغیره می‌باشد و در موقعیتی که با علامت مشخص شده است تغییر مسیر پیدا می‌کند. علامت پیکان نمایانگر فشار بالا و اگر $dp/dT = 0$ باشد نمایانگر سمت دمای بالا بر روی منحنی یک متغیره می‌باشد. در شکل ۳ دو مجموعه متفاوت از نقاط بدون تغییر هم‌منوع شامل $[A] \rightarrow [B]$ و $[A] \rightarrow [C]$ بر روی منحنی یک متغیره بصورت غیر هم‌زمان پایدار خواهد بود. تمام احتمالات ممکن از اجتماع نقاط نامتغیره هم‌منوع در سیستم ترمودینامیکی مورد بحث در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

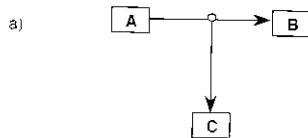
جدول ۳ - مجموعه‌های یک متغیره و واکنش‌های مرتبط کننده آنها به یکدیگر (A, U عبارت است از مجموعه یک متغیره).

No.	Reaction	dP/dT
R-1	15Chl+86Di+67Qtz=6Pmp+31Act+8H ₂ O	103.80
R-2	25Pmp+2Chl+29Qtz=43Ep+7Act+67H ₂ O	53.30
R-3	50Di+9Chl+43Qtz=6Ep+19Act+14H ₂ O	63.60
R-4	19Pmp+10Qtz=Chl+31Ep+14Di+47H ₂ O	52.60
R-5	9Pmp+7Qtz=15Ep+4Di+Act+23H ₂ O	52.90
R-6	86Lws+17Act=30Pmp+11Chl+95Qtz+40H ₂ O	26.00
R-7	Lws+2Act=5Di+Chl+5Qtz	0.00
R-8	31Lws+17Di=12Pmp+Chl+21Qtz+16H ₂ O	28.10
R-9	11Di+15Lws=6Pmp+Act+8Qtz+8H ₂ O	28.80
R-10	10Lws+Act=6Ep+Chl+7Qtz+14H ₂ O	37.90
R-11	14Lws+5Pmp=17Ep+Chl+4Qtz+33H ₂ O	44.20
R-12	4Lws+5Pmp+3Qtz=11Ep+Act+19H ₂ O	44.40
R-13	19Lws+5Di=12Ep+Chl+9Qtz+28H ₂ O	40.30
R-14	9Lws+5Di=6Ep+Act+2Qtz+14H ₂ O	41.10
R-15	Pmp+Qtz=Lws+Ep+Di+H ₂ O	95.60
R-16	12Act+15Chl+86Ab=6Pmp+43Gln+19Qtz+8H ₂ O	-2.70
R-17	Act+2Ab=2Di+Gln+2Qtz	0.00
R-18	24Di+15Chl+62Ab+5Qtz=6Pmp+31Gln+H ₂ O	-3.80
R-19	9chl+6Act+50Ab=25Gln+6Ep+7Qtz+14H ₂ O	-9.00
R-20	6Pmp+3Chl+14Ab+5Qtz=7Gln+12Ep+20H ₂ O	-146.80
R-21	2Gln+9Pmp+11Qtz=15Ep+3Act+4Ab+23H ₂ O	39.80
R-22	12Di+9Chl+38Ab+5Qtz=19Gln+6Ep+14H ₂ O	-12.30
R-23	9Pmp+2Ab+5qtz=6Di+15Ep+Gln+23H ₂ O	63.30
R-24	Act+2Chl+10Ab=5Gln+2Lws	0.00
R-25	17Gln+24Lws=6Pmp+9Chl+19Qtz+34Ab+8h ₂ O	5.00
R-26	30Lws+9Act+22Ab=12Pmp+11Gln+38Qtz+16H ₂ O	-69.80
R-27	Di+Chl+4Ab+Qtz=2Gln+Lws	0.00
R-28	15Lws+9Di+2Ab=Gln+6Pmp+10Qtz+8H ₂ O	38.80
R-29	5Gln+12Lws=6Ep+3Chl+10Ab+7Qtz+14H ₂ O	19.00
R-30	3Act+18Lws+10Ab=12Ep+5Gln+14Qtz+28H ₂ O	86.30
R-31	3Pmp+6Lws+2Ab=Gln+9Ep+Qtz+17H ₂ O	56.60
R-32	3Di+Lws+2Ab=Gln+6Ep+4Qtz+14H ₂ O	52.00

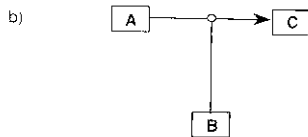
جدول ۴ - ارتباطات همنوع و غیر همنوع بر روی ۳۲ منحنی یک متغیره موجود در سیستم.

No.	Homotypical	Hetrotypical
R-1	[1]-[2]/[1]-[7]	[2]*[7]
R-2	[1]-[3]/[1]-[8]	[3]*[8]
R-3		[1]*[4]*[9]
R-4		[1]*[5]*[10]
R-5	[1]-[6]/[1]-[11]	[6]*[11]
R-6	[2]-[3]/[2]-[12]	[3]*[2]
R-7	[13]-[2]/[13]-[4]	[2]*[4]
R-8		[2]*[5]*[14]
R-9	[2]-[6]/[2]-[15]	[6]*[15]
R-10	[3]-[16]/[4]-[16]	[3]*[4]
R-11		[3]*[5]*[17]
R-12	[3]-[6]/[3]-[18]	[6]*[18]
R-13	[5]-[4]/[5]-[19]	[4]*[19]
R-14	[4]-[20]/[6]-[20]	[4]*[6]
R-15		[5]*[6]*[21]
R-16	[8]-[7]/[8]-[12]	[7]*[12]
R-17	[7]-[11]/[15]-[11]	[7]*[9]*[13]
R-17	[13]-[15]/[13]-[20]	[9]*[11]*[20]
R-18	[7]-[14]/[10]-[14]	[7]*[10]
R-19		[8]*[9]*[16]
R-20	[8]-[17]/[10]-[17]	[8]*[10]
R-21	[8]-[11]/[18]-[11]	[8]*[18]
R-22	[9]-[10]/[9]-[19]	[10]*[19]
R-23	[10]-[21]/[11]-[21]	[10]*[11]
R-24	[13]-[12]/[13]-[16]	[12]*[16]
R-25	[12]-[17]/[14]-[17]	[12]*[14]
R-26	[12]-[15]/[18]-[15]	[12]*[18]
R-27		[13]*[14]*[19]
R-28	[14]-[21]/[15]-[21]	[14]*[15]
R-29		[16]*[17]*[19]
R-30	[16]-[18]/[16]-[20]	[18]*[20]
R-31	[17]-[21]/[18]-[21]	[17]*[18]
R-32		[19]*[20]*[21]

بخش انتهایی از یک خط ارتباطی که دارای علامت پیکان است به نام انتهای درون جریانی (Inflow) و بخش انتهایی که فاقد علامت پیکان است بنام انتهای برون جریانی (Outflow) نامگذاری شده‌اند. معمولاً هر نقطه بدون تغییر دارای خطوط ارتباطی از هر دو نوع درون و برون جریانی است. ولی بعضی نقاط وجود دارند که تنها از خطوط ارتباطی درون جریانی تشکیل شده‌اند و بنام نقاط بدون تغییر درون جریانی نامیده شده‌اند. در نقطه مقابل نیز نقاطی وجود دارند که تنها از خطوط ارتباطی برون جریانی تشکیل شده و بعنوان نقاط بدون تغییر برون جریانی معروفند.

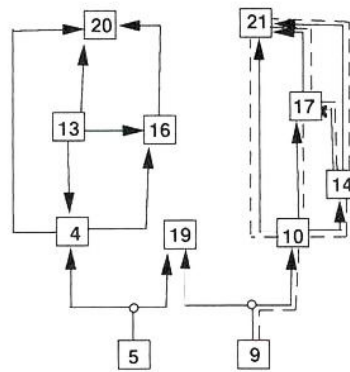
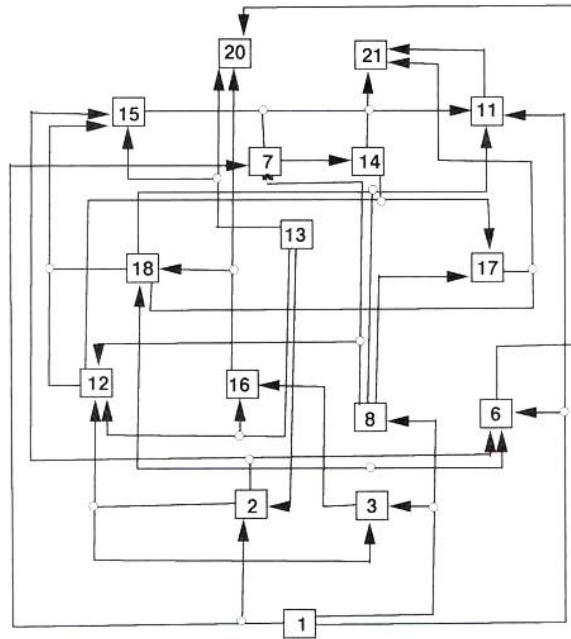


شکل ۳- دو نوع مدار ارتباطی ممکن از نقاط بدون تغییر و هم‌نوع (a) حالات b و c و شکل ۲ و (b) حالات d و e و شکل ۲.



در این روش پیشنهادی، هیچ نقطه بدون تغییری نمی‌تواند در محدوده فشاری پایین‌تر از نقطه بدون تغییر برون جریانی قرارگیرد و لذا نقطه بدون تغییر درون جریانی در بالاترین فشار ممکن در میان نقاط بدون تغییر تشکیل‌دهنده شبکه پتروژنتیکی قرار می‌گیرد.

در سیستم نمونه مورد بحث نقاط بدون تغییر [1], [5], [9] از نوع برون جریانی و نقاط بدون تغییر [19], [20], [21] از انواع درون جریانی هستند. نقاط بدون تغییر [1], [9] توسط واکنش ۳ - R و نقاط متغیر [1], [5] نیز توسط واکنش ۴ - R بطور غیر هم‌نوع به یکدیگر متصل شده‌اند. بنابر این نقطه بدون تغییر [1] با نقاط بدون تغییر [5], [9] نمی‌تواند همزیست باشد. با این توضیحات دو مدار متفاوت از نقاط بدون تغییر برای سیستم حاصل می‌شود. یکی از آنها شامل [1] به عنوان نقطه بدون تغییر برون جریانی و نقاط [21], [20] به عنوان نقاط بدون تغییر درون جریانی می‌باشد. مدار دو شامل نقاط بدون تغییر [5] با [9] بعنوان نقاط برون جریانی و نقاط بدون تغییر [19], [20], [21] بعنوان نقاط درون جریانی می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۴- دو مدار از نقاط بدون تغییر در سیستم ترمودینامیک مورد بحث. نقاط بدون تغییر [5], [9], [1] از نوع برون جریانی و نقاط بدون تغییر [19], [20], [21] از نوع درون جریانی می باشند. یک مجموعه ممکن از نقاط بدون تغییر [9], [10], [14], [21], [17] نیز با خطوط ناپیوسته نشان داده شده اند.

در زیر چگونگی ترکیب نقاط بدون تغییر که شبکه پتروژنتیکی را تشکیل می‌دهند از روی مدار نقاط بدون تغییر تشریح شده است. به عنوان مثال واکنش ۲۲-R نشان می‌دهد که دو مجموعه نقاط بدون تغییر [19] - [9]، [10] - [9] دارای ارتباط هم‌نوع هستند و لذا در یک زمان همزیست نمی‌باشند. در حالت اول فرض کنید که خط ارتباطی بین [10] - [9] پایدار می‌باشد. با این فرض نقطه بدون تغییر [10] پایدار می‌شود و بنابر این تمام واکنش‌های یک متغیره مرتبط با نقطه بدون تغییر [10] نیز بایستی پایدار باشند. واکنش‌های 18-R، 20-R، 23-R نشان می‌دهند که خطوط ارتباطی [14] - [10]، [17] - [10]، [10] - [10]، [21] - [10] پایدارند. به طریق مشابه هنگامیکه نقاط بدون تغییر [14] - [17] پایدار شوند خطوط ارتباطی [21] - [17]، [21] - [14] نیز به ترتیب پایدار می‌شوند. به دلیل اینکه هیچ نوع خط ارتباطی برون‌جریانی از نقطه بدون تغییر [21] خارج نمی‌شود بنابراین خاتمه جریان مداری فرا می‌رسد و دو ترکیب زیر از مدار نقاط بدون تغییر حاصل می‌شود:

الف) [21]، [17]، [14]، [10]، [9]

ب) [19]، [9]، [5]

با ادامه روش فوق از نقطه بدون تغییر برون‌جریانی [1] چهار مجموعه و از نقاط بدون تغییر برون‌جریانی [9]، [5] سه مجموعه دیگر حاصل دیگر حاصل می‌شود که عبارتند از:

1) [19]، [9]، [5]

2) [20]، [16]، [13]، [5]، [4]

3) [21]، [17]، [14]، [10]، [9]

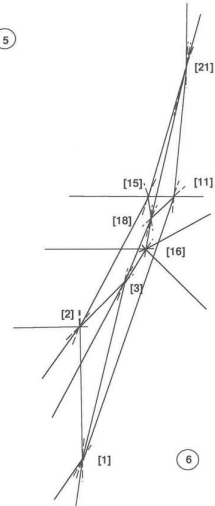
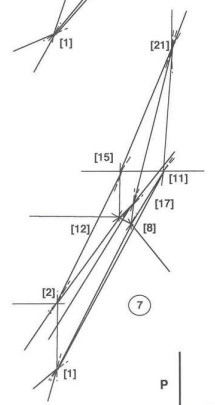
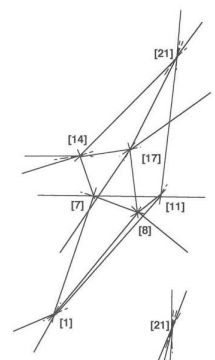
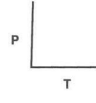
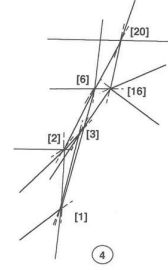
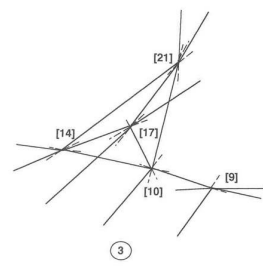
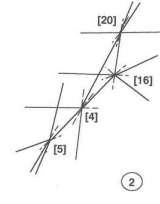
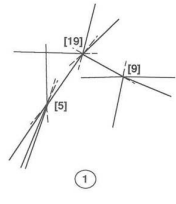
4) [20]، [16]، [13]، [6]، [3]، [2]، [1]

5) [21]، [17]، [14]، [11]، [7]، [7]، [1]، [1]

6) [21]، [18]، [16]، [15]، [13]، [11]، [3]، [2]، [1]

7) [21]، [17]، [15]، [13]، [12]، [11]، [8]، [2]، [1]

با توجه به اینکه موفقیت نسبی منحنی‌های یک متغیره خارج شده از هر نقطه بدون تغییر در نمودار فشار - دما تعیین شده است لذا محل تقاطع منحنی‌های یک متغیره موفقیت نسبی نقطه بدون تغییر را در نمودار فشار - دما تعیین می‌کند. سپس نقاط بدون تغییر توسط منحنی‌های یک متغیره بر اساس قوانین مطرح شده به یکدیگر مرتبط شده تا شبکه‌های پتروژنتیکی ایجاد شود. هفت شبکه پتروژنتیکی حاصل شده از هفت مجموعه نقاط بدون تغییر در شکل ۵ ترسیم شده‌اند.



شکل شماره ۵ - نمایش هفت شبکه پتروژنتیکی شامل نقاط بدون تغییر،

- ۱) شبکه پتروژنتیکی شامل نقاط بدون تغییر، [5], [9], [19]
- ۲) شبکه پتروژنتیکی شامل نقاط بدون تغییر [4], [5], [13], [16], [20]،
- ۳) شبکه پتروژنتیکی شامل نقاط بدون تغییر، [9], [10], [14], [17], [21]
- ۴) شبکه پتروژنتیکی شامل نقاط بدون تغییر [1], [2], [3], [6], [13], [16], [20]
- ۵) شبکه پتروژنتیکی شامل نقاط بدون تغییر [1], [7], [8], [11], [14], [17], [21]
- ۶) شبکه پتروژنتیکی شامل نقاط بدون تغییر [18], [21], [16], [15], [13], [11], [3], [2], [1]
- ۷) شبکه پتروژنتیکی شامل نقاط بدون تغییر [17], [21], [15], [13], [12], [11], [8], [2], [1]

تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از تحقیقات نگارنده در گروه پتروولوژی سنگهای دگرگون فشار بالا دانشگاه کیوتو ژاپن می‌باشد. بدینوسیله از هدایتها و حمایت‌های همه جانبه اساتید گرانقدر Professor S. Banno و Dr. T. Hirajima صمیمانه تشکر می‌نمایم. بویژه از آقای دکتر هیراجیما که اجازه استفاده از نتایج تحقیقات منتشر نشده خود را داده‌اند بسیار سپاسگزاری می‌نمایم. نظرات منتقدانه سه داور این مقاله موجب ارتقاء کیفی آن گردید که از آنان نیز نهایت تشکر را دارم.

References

- Banno, S., and Sakai, C., (1989) *Geology and metamorphic evolution of the Sanbagawa metamorphic belt, Japan, In: Evolution of metamorphic belt (ed. By J.S. Daly, R.A., Cliff and B.W.D., Yardly)*, Geol. Soc. Spec. Pub., **43**, 519–532.
- Black, P.M., (1977) *Regional high pressure metamorphism in New Caledonia: phase equilibria in the ouegoa district*, Tectonophysics, **43**, 89 – 107.
- Brown, E.H., (1977) *The crossite content of Ca-amphibole as a guide to pressure of metamorphism*, J. Petr., **180**, 53–72.
- Burnham, C.W., Holloway, J.R., and Davis N.F., (1969) *Thermodynamic properties of water to 1000°C and 1000 bars*, Geol. Soc. America Spec. Pub., No.132.
- Ernst, W.G., (1972) *CO₂-poor composition of the fluid attending Franciscan and Sabagawa low-grade metamorphism*, Geochemica et Cosmochemica Acta, **36**, 497 – 5040
- Enami, M., (1983) *Petrology of pelitic schists in the ologiclaste-biotite zone of the Sanbagawa metamorphic terrian, Japan: phase equilibria in the highest grade*

- zone of a high-pressure intermediate type of metamorphic belt, *J. Meta. Geol.*, **1**, 141–161.
- Frey, M., De Capitani, C., and Liou, J.G., (1991) *A new petrogenetic grid for low-grade metabasite*, *J. Meta. Geol.*, **9**, 497–509.
- Fyfe, W.S., Turner, F.J., and Verhoogen, J., (1958) *Metamorphic reactions and metamorphic facies*, *Geol. Seol. Soc. America Memo.*, No.73.
- Higashino, T., (1975) *Biotite zone of Sanbagawa metamorphic terrain in the Siragyama area, central Shikoku, Japan*, *J. Geol. Soc. Japan*, **81**, 653–670.
- Higashino, T., (1990) *The higher grade metamorphic zonation of the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan*, *J. Meta. Geol.*, **8**, 413–423.
- Hirajima, T., (1983) *Petrological study of the Sanbagawa metamorphic belt in the Kanto mountains, central Japan*, ph.d thesis, Kyoto University, Unpublished 260.
- Hirajima, T., (1983) *The analysis of paragenesis of glaucophanitic metamorphism for a model ACF system by Schreinemakers method*, *J. Geol. Soci. Japan*, **89**, 679–691. In Japanese.
- Korzinsky, D.S., (1959) *Physicochemical basis of the analysis of the paragenesis of minerals*, Consultants, Bureau, New York.
- Kretz, R., (1983) *Symbols for rock-forming minerals.*, **63**, 1023–1052.
- Powell, R., and Holland, T.J.B., (1988) *An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest*, *J. Meta. Geol.*, **16**, 309–343.
- Robie, R.A., Hemmingway, B.S., And Fisher, J.R., (1978) *Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298,15K and 1 bar (10⁵ pascals) pressures and higher temperatures*, U.S., *Geol. Surv. Bull.*, N. 1452.
- Wallis, S.R., and Banno S., (1990) *The Sanbagawa belt—trends in research*, *J. Meta. Geol.*, **8**, 393–399.
- Wallis S. R., Banno S., and Radwan M., (1992) *Kinematics, structure and relationship to metamorphism of east-west flow in the Sanbagawa belt southwest, Japan*, *The Island Arc*, **1**, 176–185.
- Zen, E-an., (1966) *Construction of pressure-temperature diagrams for multicomponent system after the method of Schreinemakers: A geometric approach*, U.S., *Geol. Surv. Bull.*, 1225–56.
- Zen, E-an., (1967) *Some topological relationships in multisystems of n+3 phases. I. General theory, unary and binary systems*, *American J. Sci.*, **264**, 401–427.
- Zen, E-an., (1967) *Some topological relationships in multisystems of n+3 phases. II. Unary and binary metastable sequences*, *American J. Sci.*, **265**, 871–897.
- Zen, E-an., and Roseboom E.H., (1972) *Some topological relationships in multisystems of n+3 Phases. III, ternary systems*, *American J. Sci.*, **272**, 677 – 734.