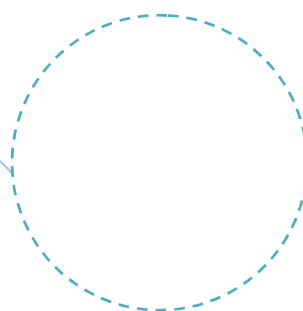
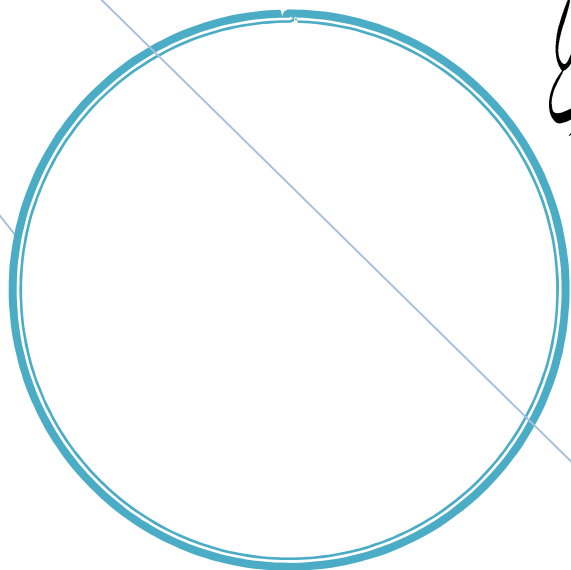


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



ZaminAzmoon Group

جزوات وقف عام گروه زمین آزمون

غیر قابل فروش



پترولوژی

جزوات آمادگی آزمون کارشناسی ارشد و دکتری زمین شناسی

تألیف: دکتر رامین صمدی

تذکر: گروه مولفین زمین آزمون مطابق حقوق مؤلفان و مصنفان مصوب مجلس محترم شورای اسلامی با افراد حقیقی یا حقوقی که از نام یا محتوای جزوات تألیفی گروه زمین آزمون به صورت غیرقانونی و بدون مجوز جهت فروش استفاده و یا جزوات غیر قابل فروش گروه را در شبکه های مجازی و یا موسسات به فروش برسانند از طریق مراجع قانونی برخورد مقتضی را خواهد نمود. فروش کلیه جزوات آمادگی آزمون کارشناسی ارشد و دکتری زمین شناسی گروه آموزشی زمین آزمون توسط افراد حقیقی یا حقوقی و یا مؤسسات آموزشی ممنوع و این جزوات وقف عام است.

بسمه تعالی

پيامبر خدا (صلی الله علیه وآله وسلم) فرمودند:

حرگاه مؤمن یک برکه که روی آن علمی نوشته شده باشد از خود بر جای گذارد، روز قیامت آن برکه پرده میان او و آتش می شود و خداوند تبارک و تعالی به ازای حر حرمتی که روی آن نوشته شده، شیری بهشت برابر پستو تر از دنیا به او می دهد.

سلام علیکم؛

ایزدانار پاس می گویم که ما ریاکاری بخشید تا بتوانیم در زمینه تحقق آرمان های علمی و میهنی خویش، گامی دیگر برداریم. «زمین آزمون» با هدف ایجاد بانک اطلاعاتی جزوات آمادگی آزمون کارشناسی ارشد و دکتری زمین شناسی و نیز کمک به دانشجویان و محققین این رشته در سال ۱۳۸۶ آغاز به فعالیت نمود. در این راه استادان و دانشجویان و پژوهشگران محترمی با هم فکری خود به مایاری رسانده اند که اگر این هم فکری و کمک ها نبود شاید این مهم ناتمام می ماند.

اکنون به پاس ۱۰ سال تلاش صادقانه گروه آموزشی و پژوهشی زمین آزمون، هزاران امید و تلاش به ثمر نشسته است و فریختگان بسیاری همراه ما با موفقیت در دوره های کارشناسی ارشد و دکتری زمین شناسی تحصیل نموده اند. برای پاسداشت علم و ترویج علم مقدس زمین شناسی، گروه زمین آزمون کلیه جزوات آمادگی آزمون کارشناسی ارشد و دکتری زمین شناسی خود را به صورت وقف عام به همه فریختگان جامعه علمی زمین شناسی ایران تقدیم می نماید. شایسته است از زحمات آقای مهندس مجتبی رجبی، خانم دکتر زکریا شیردشت زاده، خانم مهندس یسرا محمودزاده، آقای مهندس رسول صادقی و دیگر بزرگواران تقدیر گردد. بی گمان این مجموعه از کاستی ها و نواقص احتمالی مبری نیست ولی می تواند مسیری روشن را پیرامون داوطلبان محترم و پژوهشگران کرامی بگشاید. پیروزی و موفقیت شما در تمامی آزمون های زندگی آرزو مندیم.

مدیر گروه مؤلفین زمین آزمون

دکتر امین صدیقی



پترولوژی (PETROLOGY)

* **پترولوژی:** علم شناخت سنگ است که شامل دو بخش است:

پتروگرافی: سنگ‌شناسی توصیفی شامل خصوصیات ظاهری مثل ساخت اندازه...

پتروژنز: در مورد منشأ و طرز تشکیل سنگ بررسی می‌کند.

* **پترولوژی** شامل مطالعه تاریخ تشکیل هر سنگ، از جمله شرایط تشکیل، منشأ و فرسایش و تخریب است. پترولوژی

شامل پتروگرافی (علم توصیف و رده‌بندی سنگ‌ها یعنی سنگ‌شناسی) و پتروژنز (شرایط تشکیل سنگ‌ها و

کانسنگ‌ها) است.

بعضی از محققین پترولوژی را به دو بخش دیگر تقسیم می‌کنند که عبارت‌اند از:

۱- **پتروگرافی Petrography** یا علم توصیف و رده‌بندی سنگ‌ها امروزه سنگ‌شناسی نوین نوعی تاریخ‌نگاری از حوادثی است که آثار آن در سنگ‌ها به‌جا مانده است به‌طور خلاصه پتروگرافی یا سنگ‌شناسی توصیفی بخشی از سنگ‌شناسی است که وظیفه آن توصیف Description، نام‌گذاری Nomination و طبقه‌بندی Classification سنگ‌هاست. بهترین راه جهت پتروگرافی سنگ‌ها، بررسی میکروسکوپی مقاطع نازک Microscopic examination Thin Section آن‌هاست.

۲- **پتروژنز Petrogenesis** یا سنگ‌شناسی ژنتیکی، مطالعه منشأ و تکامل سنگ‌ها است یا به‌عبارت‌دیگر در مورد شرایط تشکیل سنگ‌ها و کانسنگ بحث می‌شود و شامل موضوعاتی هم چون منشأ Origin و نحوه تشکیل Formation سنگ‌ها مدنظر است که در این راه، محدوده عملیات نسبت به سنگ‌شناسی توصیفی، گسترده خواهد بود و از ابزار پیشرفته‌تری استفاده خواهد شد.

شایان‌ذکر است لیتولوژی Lithology که متأسفانه آن‌هم به سنگ‌شناسی ترجمه‌شده است توصیف سنگ‌ها به‌خصوص در نمونه دستی Hand Sample و رخنمون Out crop آن‌ها موردنظر بوده و خصوصیات هم چون رنگ، ترکیب کانی‌ها، اندازه دانه‌ها و به‌طور کلی فابریک سنگ‌ها موردبررسی قرار می‌گیرد؛ که از این لحاظ مشخص می‌شود لیتولوژی با پتروگرافی ارتباط نزدیکی دارد ولی باید توجه داشت که لیتولوژی خصوصیات فیزیکی و ظاهری سنگ‌ها را در حد مایکروسکوپی مورد مطالعه قرار می‌دهد درحالی‌که در پتروگرافی مطالعات کامل‌تر و دقیق‌تر خواهد بود. مسائلی هم چون نحوه ارتباط صحرایی سنگ‌ها و تماس آن‌ها با یکدیگر، چگونگی توزیع سنگ‌ها، شیب و امتداد لایه‌ها و شکستگی‌ها و سایر موارد مشابه در حیطه عملکرد لیتولوژی قرار دارد.

* **تعریف سنگ (ROCK):** جسم جامد، طبیعی، هتروژن که از اجتماع یک یا چند نوع کانی ایجاد شده است. سنگ‌ها

سه دسته‌اند: رسوبی، آذرین، دگرگونی. اصلی‌ترین جزء تشکیل‌دهنده سنگ‌ها کانی است.

* **کانی (MINERAL):** جسم جامد، طبیعی (غیر آلی) هموزن، دارای خصوصیات فیزیکی مشخص و ترکیب شیمیایی

معین که به دو دسته سیلیکاته و غیر سیلیکاته تقسیم می‌شوند.



* پاراژنز شامل مجموع‌های از کانی‌های با شرایط تشکیل مشابه از نظر شیمیایی و ترمودینامیکی است که باهم در تعادل می‌باشند.

* ایزومورفیسم و پلی مورفیسم:

☞ پلی مورفیسم: کانی‌هایی که فرمول شیمیایی یکسان ولی سیستم تبلورشان متفاوت است.

آلوتروپی یا پلی مورفیسم عبارت است از:

▪ **اناسیوتروپ:** ۲ کانی تحت شرایط فیزیکی متغیر (T,P) به هم تبدیل می‌شوند پس این فرآیند برگشت پذیر است، مانند گروه کوارتز.

▪ **مونوتروپ:** پلی مورف‌های غیر قابل برگشت، مانند: آراگونیت ← کلسیت

✓ توجه: در فرآیندهای برگشت پذیر $d_s = \frac{dq}{T}$ ، برگشت ناپذیر $d_s > \frac{dq}{T}$

☞ ایزومورفیسم: سیستم تبلور یکسان ولی ترکیب شیمیایی متفاوت است، مانند: Plg, Gar, Px, Oliv

* محلول جامد یا مخلوط جامد یا میکس کریستال:

☞ نوعی ایزومورفیسم که در آن عناصر با شرایط زیر جایگزین هم می‌شوند:

▪ اختلاف شعاع یونی آن‌ها از ۱۵٪ یا ۰/۱۵ بیشتر نباشد، مثلاً کلسیت (Ca) و اسمیت زونیت (Zn) به علت اختلاف شعاع یونی بالا به رگم ایزومورف بودن، نمی‌توانند محلول جامد تشکیل دهند.

▪ اختلاف بار الکتریکی بیشتر از (۱) نباشد.

✓ توجه: برای تشکیل محلول جامد هر دو شرایط بالا الزامی است.

✓ نکته: در بعضی موارد به رگم ایزومورف نبودن محلول جامد تشکیل می‌گردد. به طور مثال اسفالریت (بلاند یا Zns) با سیستم Cubic و پیروتیت (پیریت مغناطیسی) با سیستم مونوکلین، ایزومورف نیستند ولی به علت داشتن شرایط بالا، محلول جامد می‌باشند.

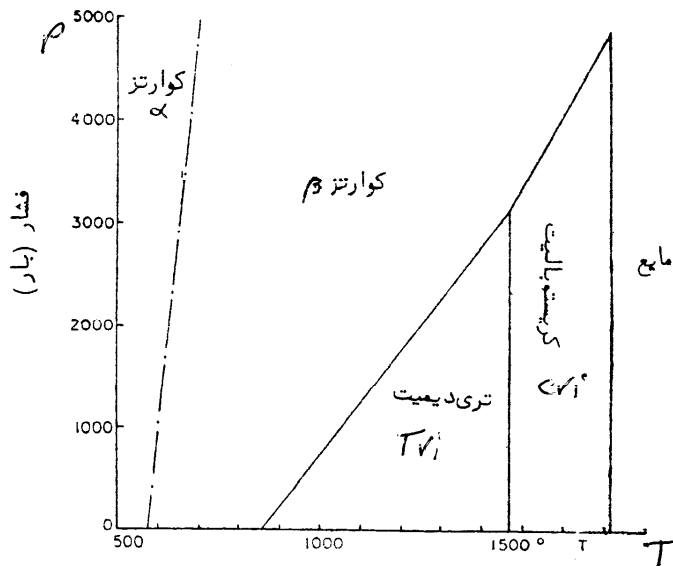
✓ نکته: محلول جامد حذف شده یا ناقص ← پیروتیت (فقدان آهن)

✓ نکته: محلول جامد در همه سیلیکات‌ها به غیر از خانواده سیلیس وجود دارد.

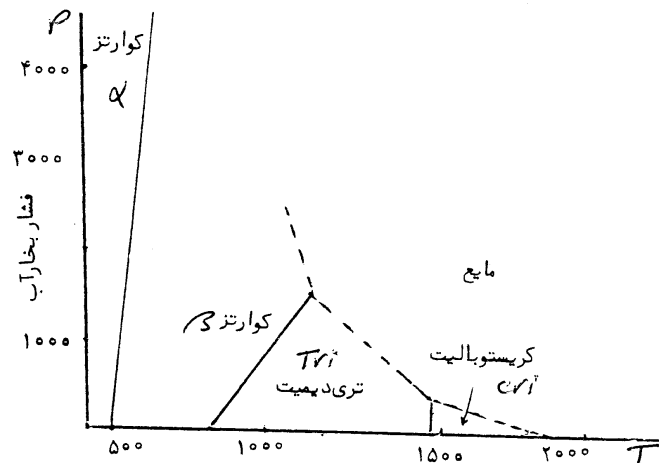


* دیاگرام‌های پلی مورف‌های کوارتز:

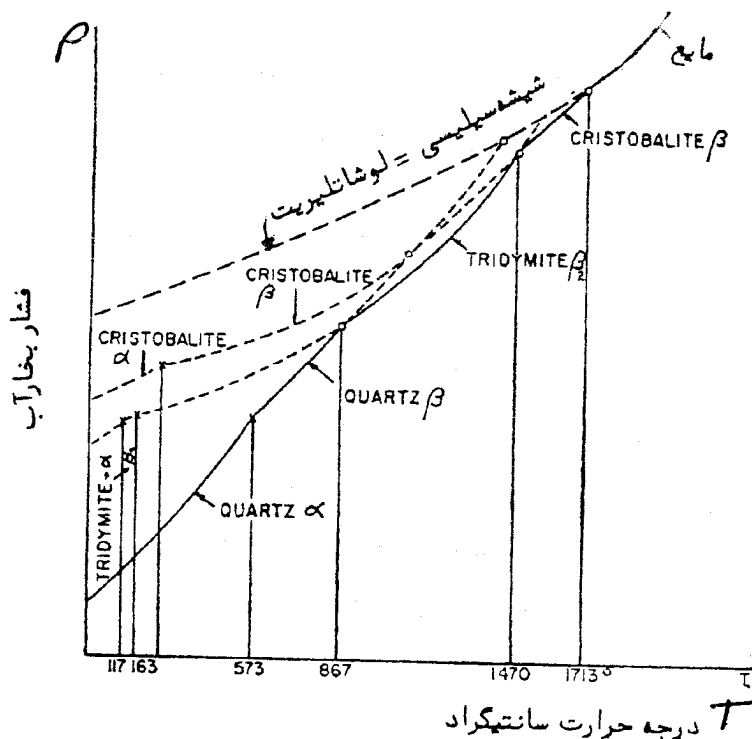
- ✓ در سنگ‌های درونی ما اصلاً Tri (تری‌دیمیت) و Cri (کریستوبالیت) را نداریم.
- ✓ Cri, Tri در سنگ‌های آذرین خروجی در حرارت بالا تشکیل می‌شوند.
- ✓ بالاترین حرارت متعلق به کریستوبالیت است.
- ✓ شرایط خشک و فشار معمولی: $\alpha \leftarrow \beta \leftarrow Tri \leftarrow cri \leftarrow$ مایع
- ✓ شرایط خشک و فشار بالا: $\alpha \leftarrow \phi \leftarrow$ مایع
- ✓ شرایط آبدار: $\alpha \leftarrow \beta \leftarrow Tri \leftarrow cri \leftarrow$ مایع
- ✓ در شرایط خشک محدوده پایداری Cri, Tri بیشتر است.
- ✓ در شرایط آبدار محدوده پایداری Cri, Tri کمتر است.



● دیاگرام پایداری انواع مختلف سیلیس Si در شرایط حرارت و فشار خشک



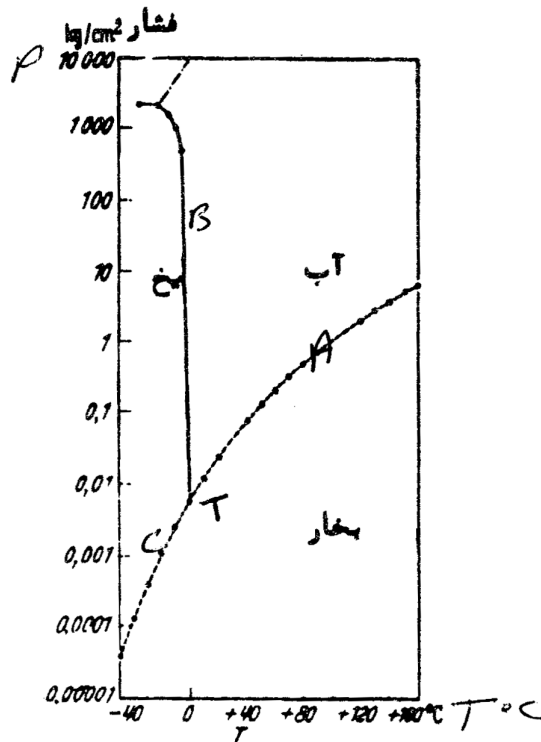
● **دیاگرام پایداری انواع مختلف سیلیس حرارت و فشار آب**



شرایط تبدیل انواع مختلف SiO_2 (فتر، ۱۹۱۳)

✓ **دیاگرام انستاتیت:** نوعی PX که در سنگ‌های بازیک و فوق بازیک یافت می‌شود.

- ✓ حرارت پایین ← کلینوانستاتیت
- ✓ حرارت متوسط ← رومبوانستاتیت
- ✓ حرارت بالا ← پرتوانستاتیت
- ✓ این ۳ مورد قابل تبدیل به هم بوده و در کل منظور از انستاتیت در کتاب‌ها همان پرتوانستاتیت است.
- ✓ ذوب و کریستالیزاسیون (تبلور) کانی‌ها:
 - ذوب ناجور یا غیرعادی یا ناسازگار: ترکیب شیمیایی ماده ذوب شده با جامد اولیه متفاوت است، مثلاً:
 - انستاتیت (PX) ذوب متناقض ← Fo(Olv) جامد + Si مایع
 - ارتوکلاز (Or) ذوب متناقض ← LUC جامد + Si مایع
 - ذوب جور یا عادی یا سازگار: ترکیب مایع با جامد اولیه یکسان است، مانند پلی مورف‌های کوارتز.



حالات مختلف آب بر حسب تغییرات درجه حرارت و فشار

- ✓ T یا نقطه تریپل: وجود سه فاز آب با هم.
- ✓ منحنی جوش = A، منحنی ذوب = B، منحنی سوبلیماسیون = C
- ✓ همیشه با ازدیاد فشار خشک، درجه حرارت بالاتر می‌رود ولی در حضور فشار آب کاهش می‌یابد.

نکات: ✓

- در سیستم بسته فقط تبادل انرژی داریم (دگرگونی دینامیکی)
- به علت پایین بودن قابلیت هدایت حرارتی سنگ‌ها است که دما در عمق‌های زیاد بالا است.
- فابریک شامل: بافت (تکستور) + ساخت (استروکتور)

✓ سورفوزیون: عدم تعادل و مذاب ماندن ماده تا درجات پایین‌تر از حد تبلور.

✓ تبلور کانی در درجه حرارت بحرانی:

- تبلور بالاتر از آن: کانی به حالت گازی ته‌نشین می‌شود.
- تبلور پایین‌تر از آن: کانی از حالت مایع به حالت جامد متبلور می‌شود.

✓ فشار شامل: هیدرواستاتیک Pf، لیتواستاتیک Ps

- فشار هیدرواستاتیک در هر عمق معادل $\frac{1}{3}$ فشار لیتواستاتیک است.

✓ فوگاسیته اکسیژن: فعل و انفعالات اکسیژن یا اکسیژن کافی در ماگما جهت فعل و انفعالات.



- ✓ درجه پلی مریزاسیون: یک کانی عبارت است از تعداد اکسیژن که یک تتراندر با تتراندر مجاور به اشتراک می گذارد و هر چه کمتر باشد، کانی در حرارت بالاتر تشکیل می شود (فورستریت = ۰ دیوپسید = ۲، لابرادوریت = ۴)
- ✓ اسیدیتته کانی ها:

اسیدیتته	کانی
۱۰۰ درصد	کوارتز (SiO _۲)
۶۰ درصد	ارتوز K [Si _۳ AlO _۸]
۵۰ درصد	پیروکسن Mg _۲ [(SiO _۲) _۲]
۵۰ درصد	لابرادور CaNa [Si _۵ Al _۲ O _{۱۶}]
۴۰ درصد	آنورتیت Ca (Si _۳ Al _۲ O _۸)
۳۳/۳ درصد	الیوین Mg _۲ [SiO _۴]
۳۳/۳ درصد	نفلین Na [SiAlO _۴]

۶۰ > اسیدی، ۶۰-۵۰ خنثی، ۵۰ < بازی یا غیر اشباع

$$\text{اسیدیتته کانی} = \frac{\text{کاتیون Si}}{\text{مابقی کاتیون ها + Si}}$$

- محیط خشک: Oliv → Chl → Serp
- محیط آبدار: Oliv Serp → سرپانتین
- ناشناخته های سری باون مرحله Px → Amph (به علت عدم تعیین فشار اکسیژن)
- ناشناخته های سری باون مرحله Bio → Amph (به علت عدم تعیین فشار اکسیژن)
- اگر حرارت زیاد باشد: لوسیت + Si ← سانیدین
- اگر حرارت کم باشد: لوسیت + مایع Na دار ← نفلین + ارتوز
- پیروکسن Px حرارت کمتر: Opx سری ایزومورف از انستاتیت تا ارتوفروسیلیت.
- حرارت بیشتر Px هدنبرژیت، اوژیت، دیوپسید
- امفاسیت محلول جامد بین دیوپسید و ژاده ایت است.

× انواع واکنش ها:

۱. از دست دادن آب رطوبت: $R_{H_2O} \rightarrow R + H_2O - \Delta E$
۲. از دست دادن آب ساختمانی: $R_{(OH)_2} \rightarrow R_O + H_2O - \Delta E$
۳. از دست دادن گاز کربنیک یا CO₂: $R_{CO_3} \rightarrow R_O + CO_2 - \Delta E$
۴. واکنش تبدیلی: $R_{SO_3} \rightarrow R_O + SO_2 - \Delta E$
۵. $R \rightarrow \bar{R} + \Delta E$



* قوانین ترمودینامیک:

- قانون اول: رابطه بین انرژی‌ها
- قانون دوم: مفهوم جهت واکنش
- قانون سوم: مفهوم آنتروپی

* تشکیل ژادئیت یا یشم (PX فشار بالا و دفتی):

۱- آلئیت ← ژاده ایت + SiO_2 ($\Delta G > 0$ ناممکن)

۲- نفلین + کوارتز ← ژاده ایت ($\Delta G < 0$ ممکن)

۳- نفلین + آلئیت ← ژاده ایت ($\Delta G < 0$ ممکن)

* تبدیل تریدمیت به کریستوبالیت: وابسته به حرارت، α یا β : وابسته به فشار.

* در سنگ‌هایی که سریعاً سرد شده‌اند به جای α کوارتز، تریدمیت و کریستوبالیت داریم.

مقدار ناخالصی

* توجه: مقدار کاهش حرارت = رابطه عکس با فشار (P) درجه حرارت ذوب

* تعیین کانی‌های حاصل از ذوب یک کانی بر حسب درصد:

جرم مولکولی کانی به‌دست‌آمده از ذوب

درصد کانی به‌دست‌آمده از ذوب =

جرم ملکولی کانی ذوب شده

* قانون فازها یا گیبس:

$$G \Delta = G \Delta \text{ محصولات} - G \Delta \text{ مواد اولیه}$$

اگر $G \Delta = 0$: واکنش در تعادل است.

اگر $G \Delta > 0$: واکنش از راست (ناپایدار) به چپ (پایدار)

اگر $G \Delta < 0$: واکنش از چپ (ناپایدار) به راست (پایدار)

* تعیین تعداد سازنده‌ها در واکنش‌های شیمیایی:

تعداد سازنده‌ها = تعداد ترکیبات - تعداد واکنش‌ها.

* محاسبه تعداد کانی‌ها:

$$R: \text{واکنش مستقل بین فازها } (R + V) - N + 2 = \varphi$$

✓ N: تعداد تشکیل‌دهنده.

✓ ۹۹٪ ماگماها از ۷ کانی و ۸ عنصر تشکیل شده‌اند که دارای ۷ فاز هستند.

✓ C (تعداد تشکیل‌دهنده): تعداد واکنش - تعداد ترکیب

✓ اصل لوشاتلیه: با افزایش فشار سیستم به سمتی می‌رود که حجم کاهش یابد.



* **سیستم (SYSTEM):** قسمتی از جهان است که به منظور مطالعات خاص انتخاب می شود و می تواند در حد میکروسکپی (thin section) و یا ماکروسکپی (magma chamber) باشد. سیستم و محیط همیشه باهم اند (محیط چیزی است که پیرامون سیستم است)

* انواع سیستمها (بر اساس تبادل ماده و انرژی):

- ◀ منفرد یا مستقل (عالم یا جهان) یا عایق و ایزوله (با محیط تبادل ماده و انرژی نمی کند مثل سیستم های سن سنجی)
- ◀ بسته (فقط تبادل انرژی): (مثل خورشید و زمین) (مثل تبدیل بازالت یا گابرو ← اکلوژیت)
- ◀ باز: با محیط تبادل ماده و انرژی می کند یک توده نفوذی گرانیت در مارن و تبدیل آن به اسکارن
- ◀ آدیاباتیك یا بی درو رو: با محیط تبادل ماده و انرژی نمی کند ولی کار انجام می دهد مثل دیپیرهای گوشته (ماگمای گوشته)، دیپیرهای نمکی (گنبد های نمکی)

* **فاز (PHASE):** هر جزء سیستم که از نظر فیزیکی مشخص و از نظر مکانیکی قابل جدا کردن از سایر قسمت ها باشد را یک فاز است (تجزیه شیمیایی نباید روی آن اثر داشته باشد) مثل اتمسفر که از گازهای مختلف تشکیل شده ولی فقط یک فاز گازی است.

◀ هر ماده جامد یک فاز، فازهای مایع اگر محلول باشند یک فاز ولی مخلوط باشند، هر کدام یک فاز می باشند.

* سازنده شیمیایی یا جزء: (component):

- ◀ حداقل سازنده هایی که بتوان تمام فازهای سیستم را با آن تعریف بیان کرد. مثال:
- ◀ سیستمی که شامل آب، یخ و بخار است شامل سه فاز ولی یک جزء دارد (H_2O)
- ◀ پلاژیو کلاز محلول جامدی از آلپیت ($NaAlSi_3O_8$) و آنورتیت ($CaAlSi_3O_8$) است که کامپوننت آن ها آلپیت و آنورتیت است.
- ◀ الیوین که محلول جامدی از فایالیت (Fe_2SiO_4) و فورستریت (Mg_2SiO_4) است.

* تعادل (پایداری) در سیستم:

- ◀ (۱) پایدار (Stable): حداقل تبادل انرژی را با محیط اطراف و تمایل به تغییر ندارد
- ◀ (۲) نیمه پایدار (Metastable): انرژی پتانسیل آن بالاست و باید شرایط آماده شود تا به موقعیت پایدار برسد.
- ◀ (۳) ناپایدار (Unstable): انرژی پتانسیل آن حداکثر است و هر لحظه امکان تغییر و رسیدن به حالت پایدار وجود دارد.

مثلاً پلی مورف های کوارتز:

Q_α	Tri	Q_β
پایدار	نیمه پایدار	ناپایدار
→	ازدیاد حرارت	→



* قوانین ترمودینامیک:

✓ **قانون صفرم:** بیان می کند که اگر دو پیکره (جسم) با پیکره سومی در حال تعادل حرارتی باشند خود آن دو پیکره هم با یکدیگر در تعادل هستند.

$$A = C \text{ \& } B = C \rightarrow A = B$$

✓ **اصل بقای انرژی (قانون اول ترمودینامیک):** انرژی نه به وجود می آید و نه از بین می رود بلکه از حالتی به حالت دیگر تبدیل می شود.

✓ **قانون دوم ترمودینامیک (آنتروپی یا بی نظمی سیستم S):** که نشان دهنده جهت واکنش ها است.

✓ **قانون سوم ترمودینامیک (آنتالپی H):** بیان می کند که آنتروپی یک ماده خالص و بلورین در دمای صفر مطلق صفر است.

✓ **آنتالپی:** مقدار حرارتی که در فشار ثابت از محیط گرفته یا به محیط داده می شود.

گرمازا (اگزوترمیک) $-H$

گرماگیر (اندوترمیک) $+H$

✓ **فاز دیاگرام:** نمایش هندسی محیط های پایداری فازها در شرایط مختلف فشار، دما و ترکیب شیمیایی که نتیجه کارهای تجربی و محاسبات ترمودینامیک است.

✓ **قانون فازها (قانون گیبس):** توسط ویلارد گیبس ارائه شد و به شرح زیر است:

$F = C - P$	$+ 2$	متغیرهای ترمودینامیک
$+ 1$	$+$	تعیین دما و فشار
\downarrow	\downarrow	\downarrow
درجه آزادی واریانس component	فاز	

✓ **درجه آزادسازی F (واریانس):** بیان می کند که چه تعداد از متغیرها را می توان تغییر داد بدون آنکه تعادل از بین برود.

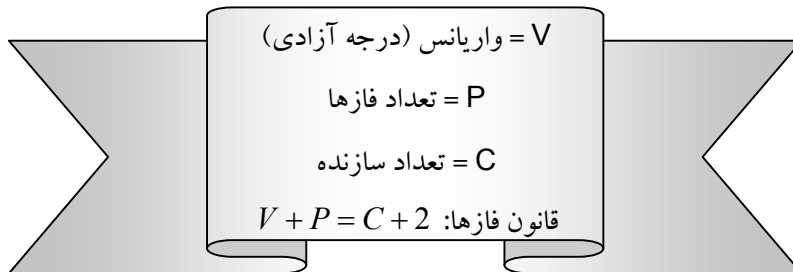
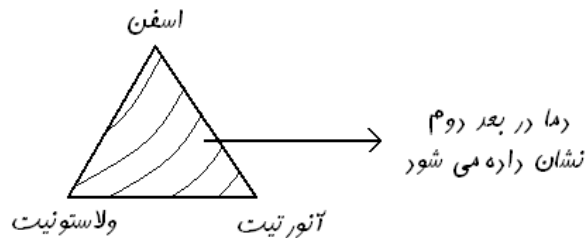
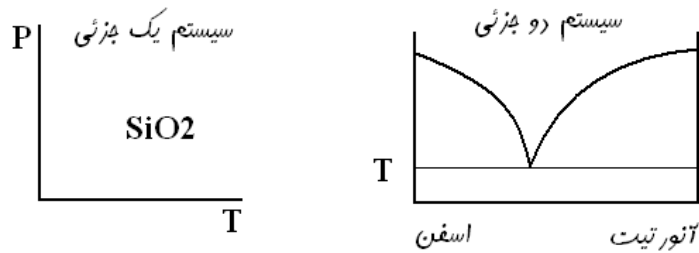
● $F = 0$: به ازای تغییر هر متغیر، تعادل به هم می خورد پس $F = 0$ نقطه ای است که هیچ متغیری رانمی توان تغییر داد (نقطه نامتغیر Invariant Point).

اگر بخواهیم حداکثر فازهای یک سیستم دیده شود باید درجه آزادی آن $F = 0$ باشد.

● $F = 1$: خطوط یا منحنی تک متغیره Uninvariant cruve.

سیستم های تک $F = C - P + 2$ (یک جزء دارد)

- $F = 2$: (میدان یا صفحه دومتغیره). سیستم‌های دوتایی و یا بیشتر $F = C - P + 1$ (دو یا بیشتر جزء دارد)
- سیستم‌های کندانسه: سیستم‌هایی هستند که فشار (P) آن‌ها ثابت و دما متغیر است و $F = C - P + 1$ برای کندانسه استفاده می‌شود. در سیستم‌های دوتایی و بیشتر فشار همیشه ثابت و دما تغییر می‌کند.



✘ نگاهی به قانون فازها در انواع سیستم‌ها:

۱- سیستم یک تشکیل دهنده: $V + P = C + 2$

۲- سیستم دو تشکیل دهنده: $V + P = C + 1$

۳- سیستم سه تشکیل دهنده: $V + P = C + 1$

۴- سیستم چهار تشکیل دهنده: شامل ۶ سیستم دوتایی و ۴ سیستم سه‌تایی.

✘ قانون فازها برای سیستم‌های کندانسه:

سیستمی که فشار بخار آب در آن مورد توجه نباشد که با نادیده گرفتن فشار بخار آب ($V=1$) می‌شود؛ لذا از عدد ۲ در فرمول اصلی $V + P = C + 2$ یک عدد کاسته می‌شود و به صورت زیر درمی‌آید:

(به جای $V \leftarrow F$)

$F + P = C + 1$ یا $(F = C - P + 1)$



سؤالات:

در یک سیستم تک جزئی حداکثر چند فاز می تواند تشکیل شود که در تعادل باشند؟

$$F = C - P + 2$$

$$0 = 1 - P + 2 \rightarrow P = 3$$

و به همین ترتیب در خط تک متغیره در سیستم تکمی ۲ فاز و در میدان دومتغیره در سیستم تکمی ۱ فاز با هم در تعادل هستند.

در یک سیستم دوتایی در نقطه نامتغیر حداکثر چند فاز است که با هم در تعادلند؟

$$F = C - P + 1$$

$$0 = 2 - P + 1 \rightarrow P = 3$$

در سیستم دوتایی در خطوط تک متغیره حداکثر چند فاز چند تا است که با هم در تعادل هستند؟

$$F = C - P + 1$$

$$1 = 2 - P + 1 \rightarrow P = 2$$

در سیستم دوتایی در میدانهای دومتغیره حداکثر چند فاز چند تا است که در تعادل است؟

$$F = C - P + 1$$

$$2 = 2 - P + 1 \rightarrow P = 1$$

در سیستم دوتایی آنورتیت - اسفن درجه آزادی را در رأس اسفن یا آنورتیت محاسبه کنید؟

$$F = C - P + 1$$

$$F = 1 - 1 + 1 \rightarrow F = 1$$

در یک سیستم سه تایی حداکثر چند فاز با هم در تعادل هستند؟

$$F = C - P + 1$$

$$0 = 3 - P + 1 \rightarrow P = 4$$

سه جامد و یک مایع در سیستم تک متغیره؟

$$F = C - P + 1$$

$$1 = 3 - P + 1 \rightarrow P = 3$$

دو جامد و یک مایع در میدانهای دومتغیره؟

$$F = C - P + 1$$

$$2 = 3 - P + 1 \rightarrow P = 2$$

در یک سیستم سه تایی در رأسها درجه آزادی چقدر است؟

$$F = C - P + 1$$

$$F = 1 - 1 + 1 \rightarrow F = 1$$



مطالعه انواع سیستم‌ها:

سیستم‌های یک تشکیل دهنده ($C=1$):

- فقط از یک ماده یا تشکیل دهنده درست شده اند، مانند پلی مورف‌های کوارتز
- با افزایش تعداد فازها درجه آزادی کاهش می‌یابد. $V \uparrow \sim P \downarrow$
- در سیستم‌های یک تشکیل دهنده اگر نقطه مورد نظر در یک محدوده باشد درجه آزادی حداکثر است یعنی $V=2$ (P, T هر دو متغیرند) اگر روی یک منحنی باشد یعنی $V=1$ (T یا P می‌تواند تغییر کند) و اگر نقطه سه گانه باشد درجه آزادی کمترین است یعنی $V=0$ (یعنی T و P هیچ کدام تغییر نمی‌کند و هر کدام تغییر کند تعادل سیستم به هم می‌خورد)
- نکته: درجه آزادی عبارت است از: $T =$ عامل حرارت، $P =$ عامل فشار، $X =$ ترکیب شیمیایی
- سیستم‌های تکی مهم شامل:

▪ سیستم SiO_2

▪ سیستم پتاسیم فلدسپات ($KAlSi_3O_8$)

▪ سیستم سدیم فلدسپات ($NaAlSi_3O_8$)

▪ سیستم آنورتیت ($CaAl_2Si_2O_8$)

▪ سیستم انستاتیت ($MgSiO_3$)

- در ادامه به بررسی هر کدام پرداخته می‌شود:

* سیستم SiO_2 :

- پلی مورف‌های حرارتی SiO_2 عبارت هستند از:
 - کوارتز α ، کوارتز β ، تری‌دیمیت، کریستوبالیت
- پلی مورف‌های فشاری SiO_2 عبارت هستند از:
 - کوارتز α ، کوزیت، استیشویت

* روند ذوب و تبلور:

- ◀ در فشار یک اتمسفر و دمای پایین کوارتز α داریم. سیستم تبلور کوارتز α تریگونال است و در سنگ‌های آذرین درونی دیده می‌شود. این پایدارترین نوع کوارتز است.
- ◀ در فشار یک اتمسفر حرارت کوارتز α را زیاد می‌کنیم. این پلی مورف در دمای $573^\circ C$ به کوارتز β تبدیل می‌شود. سیستم تبلور این پلی مورف هگزاگونال است. این تغییر ساختار را displace یا جابجایی گویند.
- ◀ کوارتز β را در سنگ‌های آذرین درونی می‌توانیم مشاهده کنیم. وقتی حرارت به حد $867^\circ C$ می‌رسد این ترکیب به تری‌دیمیت تبدیل می‌شود.



سیستم تبلور تری‌دیمیت ارتورومبیک است. این تغییر ساختار را ساختار مجدد می‌گویند (reconstructive). تری‌دیمیت مخصوص سنگ‌های آتش‌فشانی است که سریع سرد شده اند.

دما را بیشتر می‌کنیم و به 1470°C می‌رسد. تری‌دیمیت به کریستوبالیت تبدیل می‌شود (سیستم کوئیک) که مخصوص سنگ‌های آتش‌فشانی است.

وقتی دما به 1710°C برسد کریستوبالیت ذوب شده و مذابی غنی از سیلیس خواهیم داشت.

به هنگام تبلور این مذاب همین روند به صورت برعکس انجام می‌شود.

* بررسی روند فشاری

اگر فشار را افزایش دهیم در حد 4 kb از سرد شدن مذاب مستقیماً کوارتز β تشکیل می‌شود

اگر فشار به 19 kb برسد کوارتز α به کوزیت تبدیل می‌شود. کوزیت با سیستم منوکلینیک در سنگ‌های آتش‌فشانی اسیدی با انفجارهای شدید (پیروکلاست) و در محل برخورد شهاب‌سنگ‌ها دیده می‌شود.

در فشار 100 kb کوزیت تبدیل به استیشویت می‌شود (سیستم تتراگونال) که فقط در محل برخورد شهاب‌سنگ‌ها دیده می‌شود.

✓ بنابراین از پلی‌مورف‌های کوارتز می‌توان به‌عنوان ترمومتر (دماسنج) و بارومتر (بارومتر) استفاده نمود.

* سیستم پتاسیم فلدسپات: $(\text{KAlSi}_3\text{O}_8)$

■ پتاسیم فلدسپات‌ها در سنگ‌های اسیدی و حد واسط دیده می‌شوند و دارای پلی‌مورف‌های مختلفی هستند که به ترتیب از دما پایین به بالا عبارت‌اند از:

آدولاریا، میکروکلین، ارتوکلاز (ارتوز)، سانیدین

◀ آدولاریا: پلی‌مورفی است که در محلولهای گرمایی تشکیل می‌شود.

◀ میکروکلین: در سیستم تری‌کلینیک متبلور می‌شود. تتراذرها یا چهاروجهی‌ها در این پلی‌مورف از نظم خیلی خوبی برخوردارند. در سنگ‌های اسیدی درونی که دارای آب هستند دیده می‌شود (ماگمای آبدار).

◀ ارتوکلاز: در سیستم منوکلینیک متبلور می‌شود و چهاروجهی‌های آن نسبتاً منظم هستند. در سنگ‌های اسیدی تا حد واسط درونی دیده می‌شوند.



◀ **سانیدین:** پلی مورفی دما بالا است (بیشترین دما) سیستم منوکلینیک و تترائدرها نامنظم هستند. در سنگ‌های آتش فشان‌ی اسیدی دیده می‌شوند. نتیجه اینکه چون فرصت کافی برای سرد شدن نداشته (سریع سرد شده) تترائدرها نامنظم هستند.

* بررسی روند ذوب:

- ◀ از حرارت دادن میکروکلین در فشار یک اتمسفر ارتوز تشکیل می‌شود.
- ◀ از حرارت دادن ارتوز در فشار یک اتمسفر سانیدین تشکیل می‌شود.
- ◀ از حرارت دادن سانیدین در فشار یک اتمسفر و دمای 1150°C لوسیت و مذاب تشکیل می‌شود. چون پتاسیم فلدسپات در این دما به مایع خودش ذوب نمی‌شود، ذوب آن را ناسازگار یا غیرعادی می‌گویند (melting incongruent).
- ◀ بعد از دمای 1530°C لوسیت هم ذوب می‌شود و یک مذاب کامل خواهیم داشت.
- ◀ محدوده ذوب ناسازگار پتاسیم فلدسپات دمای 1150°C تا 1530°C و فشار یک اتمسفر است.
- ◀ از خاصیت ذوب غیرعادی پتاسیم فلدسپات در صنایع سرامیک‌سازی استفاده می‌شود. (شکل‌پذیری در حالت خمیری)
- ◀ حذف لوسیت از مایع مذاب باعث غنی شدن این مذاب از سیلیس می‌شود.

* بررسی روند فشاری:

- ◀ در فشار 19 kb پتاسیم فلدسپات ذوب عادی می‌شود.
- ◀ در هنگام تبلور در دمای 1530°C و فشار یک اتمسفر ابتدا لوسیت متبلور می‌شود.
- ◀ به تدریج در دمای 1150°C لوسیت با مذاب واکنش داده و پتاسیم فلدسپات از نوع سانیدین متبلور می‌شود.
- ◀ با کم شدن دما ارتوز و بعد میکروکلین متبلور می‌شوند.

* سیستم آنورتیت ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$):

- ◀ آنورتیت با درصدهای مختلف آلکیت انواع پلاژیوکلازها را به وجود می‌آورد.
- ◀ آنورتیت در فشار یک اتمسفر و دمای 1553°C ذوب می‌شود.

* بررسی روند ذوب و تبلور:

- ◀ محدوده ذوب غیرعادی آنورتیت فشار بیش از 9 kb دمای 1553°C می‌باشد که تولید کرنوم + مذاب می‌کند.
- ◀ آنورتیت در فشار 20 kb به گارنت گروسولار + کیانیت + کوارتز تبدیل می‌شود. این پدیده را در گوشته هم می‌بینیم (ترکیب سنگ گوشته اولترابازیک از نوع پریدوتیت است).



◀ تا فشار 20 kb پلاژیوکلاز پریدوتیت داریم ولی در اعماق بیشتر (فشار بیشتر) گارنت گروسولار + کیانیت + کوارتز خواهیم داشت. در فشارهای بیشتر از 30 kb و دمای نزدیک به ذوب کوارتز و پیروکسن خواهیم داشت (رخساره گرانولیت).

* سیستم آلبیت: (NaAlSi₃O₈).

◀ آلبیت دو پلی مورف دارد:

آلبیت دما پایین (Low Albite) با سیستم تری کلینیک

آلبیت دما بالا (High Albite) با سیستم منوکلینیک (منو آلبیت)

◀ نوع اول را در سنگ‌های آذرین درونی و نوع دوم را در سنگ‌های آذرین خروجی یا آتش‌فشانی می‌بینیم.

* بررسی روند ذوب و تبلور:

◀ اگر در فشار یک اتمسفر آلبیت را حرارت دهیم آلبیت دما پایین به آلبیت دما بالا تبدیل می‌شود.

◀ در دمای 1120°C و فشار یک اتمسفر آلبیت دما بالا دچار ذوب غیرعادی می‌شود از آلبیت به‌عنوان ماده کمک ذوب در صنایع سرامیک‌سازی استفاده می‌شود.

◀ در حرارت کمتر از ذوب و فشار 9 kb آلبیت به ژادئیت و کوارتز تبدیل می‌شود. در فشار حدود 19 kb ژادئیت پایدار است ولی کوارتز به کوزیت تبدیل می‌شود.

◀ محدوده ذوب غیرعادی آلبیت در فشار حدود 30 kb و دمای 1120°C است که به ژادئیت و مایع تبدیل می‌شود.

* سیستم انستاتیت: (MgSiO₃)

◀ یک نوع ارتوپیروکسن است که ۳ پلی مورف دارد:

انستاتیت دما پایین (کلینو انستاتیت)

انستاتیت دما متوسط (رمبو انستاتیت)

انستاتیت دما بالا (پروتو انستاتیت)

* بررسی روند ذوب و تبلور:

◀ در فشار یک اتمسفر اگر انستاتیت را حرارت دهیم به تدریج کلینو انستاتیت به رمو انستاتیت و رمو انستاتیت به پروتوانستاتیت تبدیل می‌شود.

◀ محدوده ذوب غیرعادی یا ناسازگار انستاتیت در دمای 1560°C است که پروتوانستاتیت به فورسیریت + مایع تبدیل می‌شود.

◀ اگر از این مذاب فورسیریت را حذف کنیم مایعی غنی از سیلیس خواهیم داشت.

◀ در فشار بیشتر از 5.5 kb و دمای ذوب، رمو انستاتیت مستقیماً به مذاب تبدیل می‌شود (ذوب سازگار). در این دما و فشار پروتو انستاتیت پایدار نیست.



سیستم‌های دو تایی ساده (C=2):

(سیستم‌های دو تایی شامل دو سازنده یا دو تشکیل دهنده)

$$V + P = C + 1$$

$$F = C - P + 1 \rightarrow F = 0 \rightarrow 0 = 2 - P + 1 \rightarrow P = 3$$

- در این سیستم‌ها حداکثر فاز $P = 3$ است که شامل ۲ فاز جامد و ۱ فاز مایع می‌شود.
 - منحنی مایع: لیکیدوس
 - منحنی جامد: سالیدوس
 - E: نقطه اتکتیک یا یوتکتیک، معرف شروع ذوب و آخر تبلور است. در این نقطه فازهای جامد و مایع در تعادل‌اند.
 - شروع ذوب در E و آخر تبلور هم در E است.
 - انواع سیستم‌های ۲ تایی:
 - سیستم دو تایی ساده
 - سیستم دو تایی پریتکتیک (واکنشی)
 - سیستم دو تایی با انحلال جامد کامل
 - سیستم دو تایی با انحلال جامد محلول
 - سیستم دو تایی با انحلال جامد و نقطه یوتکتیک
- در ادامه به بررسی هر یک از انواع سیستم‌های دو تایی مذکور پرداخته می‌شود:

◀ دیاگرام دو تایی ساده:

- ✓ موادی که از نظر شعاع یا بار یونی قابلیت جانشینی ندارند یا سیستم تبلور متفاوت داشته باشند این سیستم‌ها را تشکیل می‌دهند.
- ✓ یک سیستم دو تایی ساده قسمت‌های مختلفی دارد. مثلاً سیستم دو تایی ساده اسفن - آنورتیت شامل چند قسمت است:
 - (۱) منحنی لیکوئیدوس: این منحنی مرز بین فاز مایع و مایع - جامد است.
 - (۲) منحنی سالیدوس: مرز بین فاز جامد و مایع - جامد است.
 - (۳) نقطه یوتکتیک (A یا E): حداقل دمای ذوب و تبلور را در این سیستم دارد.

❖ سیستم اسفن - آنورتیت:

- ✓ ترکیب A:

از نظر ترکیب ۸۰ درصد آنورتیت و ۲۰ درصد اسفن دارد. (از A به سمت پایین عمود می‌کنیم و درصدها را بررسی می‌کنیم)



برای بررسی تبلور از A بر لیکوئیدوس عمود می‌کنیم که لیکوئیدوس را در نقطه h قطع می‌کند و اولین جامد تشکیل می‌شود. (تبلور آنورتیت)
 کاهش دما از h به سمت a باعث تبلور آنورتیت می‌شود. وقتی به نقطه (l) یوتکتیک رسید همزمان آنورتیت و اسفن با هم متبلور می‌شوند. در این نقطه دما ثابت می‌ماند تا تمام مایع به جامد تبدیل شود. سپس کاهش دما در این سیستم باعث تغییرات پلی مورفی می‌شود. یعنی فازهای حرارت بالا به فازهای حرارت پایین تبدیل می‌شود (حالت پایدار)

✓ ترکیب X:

محل برخورد X با لیکوئیدوس همان نقطه یوتکتیک است. یعنی حداقل دمای تبلور و همزمان اسفن و آنورتیت با هم تشکیل می‌شوند. پس در نقطه یوتکتیک، مایع همزمان تشکیل دو فاز اسفن و آنورتیت را با هم می‌دهد و در این نقطه دما ثابت می‌ماند تا تمام مایع به جامد تبدیل شود.

✓ ترکیب L:

از نظر ترکیب ۹۰ درصد اسفن و ۱۰ درصد آنورتیت دارد.
 در نقطه K از مایع L اسفن متبلور می‌شود. (کاهش دما از اسفن به سمت a) پس در مسیر K تا a اسفن متبلور می‌شود تا برسد به نقطه a که در این نقطه همزمان اسفن و آنورتیت با هم متبلور می‌شود. در این نقطه دما ثابت می‌ماند تا تمام مایع به جامد تبدیل شود و سپس تغییرات پلی مورفی صورت می‌گیرد.

✓ بررسی روند ذوب:

جامد A با ۸۰ درصد آنورتیت و ۲۰ درصد اسفن را حرارت می‌دهیم تا دمای آن به نقطه یوتکتیک برسد. در این نقطه همزمان آنورتیت و اسفن ذوب می‌شوند و دما ثابت می‌ماند تا تمام اسفن ذوب شود. بعد از اینکه تمام اسفن ذوب شد، در مسیر a تا H (محل برخورد با لیکوئیدوس) باقی‌مانده آنورتیت ذوب می‌شود.

✓ «در سیستم دوتایی ساده در نقطه یوتکتیک جامدی که درصد کمتری دارد زودتر ذوب می‌شود».

• قانون اهرم‌ها:

یعنی می‌خواهیم در هر لحظه در مسیر a تا H در یک نقطه خاص درصد فاز جامد و مایع موجود در سیستم را بررسی کنیم.

حال طبق قانون اهرم‌ها مایع A در دمای D:

از نقطه D خطی برخط ترکیب و منحنی لیکوئیدوس رسم می‌کنیم. (محل برخورد نقطه C)

$$D \text{ درصد فاز مایع در نقطه } D = (BD \div CD) \times 100$$



✓ مایع L در دمای F:

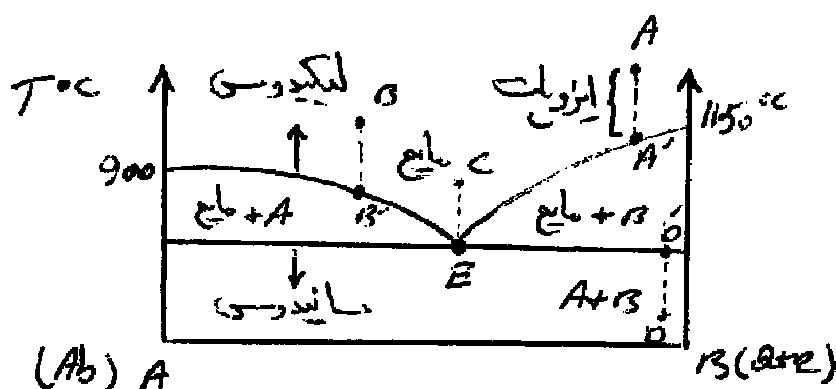
$$F \text{ درصد فاز جامد در نقطه } F = (EG \div FG) \times 100$$

$$F \text{ درصد فاز مایع در نقطه } F = (EF \div FG) \times 100$$

✓ نکته: هر چیزی که قبل از برخورد با لیکوئیدوس است مایع بوده و هر چیزی که بعد از برخورد با لیکوئیدوس است جامد است.

✓ منحنی اسفن - آنورتیت نقطه A:

در این شکل از نقطه مایع A تا قبل از برخورد با منحنی لیکوئیدوس خیلی سریع اتفاق می افتد (H). از نقطه H تا نقطه A (یوتکتیک) دما با سرعت کمتری کاهش می یابد. در نقطه یوتکتیک دما ثابت می ماند تا تمام مایع تبدیل به جامد شود. بعد از نقطه یوتکتیک دما کاهش می یابد و فقط تغییرات پلی مورفیک (ساختاری) اتفاق می افتد و چیزی تبلور نمی یابد.



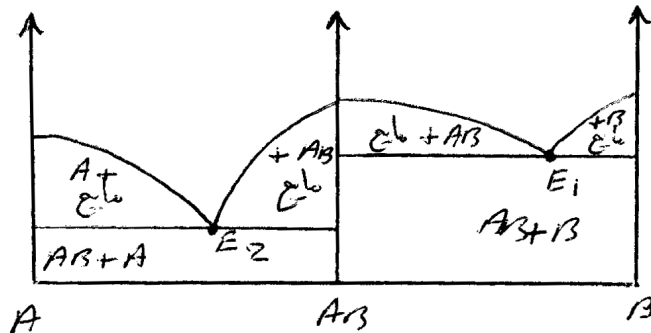
☞ تبلور مایع A: حاوی ۷۵٪ کوارتز و ۲۵٪ آلپیت است از نقطه A تبلور آغاز می گردد، تا قبل از منحنی لیکوئیدوس A' کاهش حرارت سریع، با رسیدن به A' اولین بلور Qtz متبلور شده، مابقی تبلور روی خط A'E که فقط کوارتز متبلور می شود و مایع باقیمانده از آلپیت غنی می گردد تا اینکه در نقطه یوتکتیک همزمان با Qtz، Ab متبلور شده و عمل تبلور خاتمه می یابد.

☞ تبلور مایع B: از B تا B' کاهش حرارت سریع تا در نقطه B' اولین بلور Ab متبلور می شود، بقیه عمل تبلور در مسیر E B' است که فقط Ab متبلور می شود و مایع باقیمانده از کوارتز غنی می گردد و بالاخره در نقطه E همزمان با Ab، Q متبلور شده و عمل تبلور خاتمه می یابد.

☞ تبلور مایع c: تبلور از C آغاز و در فاصله CE کاهش حرارت سریع، تا اینکه در نقطه E، Ab و Qtz همزمان متبلور شده و عمل تبلور خاتمه می یابد.

ذوب جامد D: ابتدا درصد ماده مذاب از Ab, Qtz را در نقطه E محاسبه می‌کنیم، با توجه به درصدهای داده شده چون Ab کمتر از Qtz است تمام Ab در نقطه D' ذوب می‌شود ولی فقط ۲۰٪ کوارتز ذوب می‌شود D' که از نظر حرارتی معادل نقطه E است. مابقی عمل ذوب روی EA' که در این مسیر ۵۵٪ کوارتز باقیمانده ذوب می‌شود تا در A' آخرین بلور ذوب شده و عمل ذوب خاتمه می‌یابد.

دیاگرام دوتایی حد واسط بدون نقطه واکنش:



- ✓ در این دیاگرام سازنده‌های A, B با هم در یک سنگ اصلاً یافت نمی‌شوند.
- ✓ این دیاگرام در مورد ذوب و تبلور کانی‌هایی کاربرد دارد که دارای ذوب جور یا عادی باشند.
- ✓ نحوه تعریف فرآیندها مشابه دیاگرام‌های دوتایی ساده است، ولی نقطه یوتکتیک آن باید مشخص شود (E1 یا E2).
- ✓ این دیاگرام شامل ۲ دیاگرام ساده است.

سیستم دوتایی ساده با یک ترکیب حد واسط:

در سمت چپ نمودار نفلین و در سمت راست سیلیس داریم. ترکیب حد واسط این دو آلایت است ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) اگر SiO_2 بیشتر از ۵۵ درصد باشد تبلور در سیستم دوتایی ساده آلایت - سیلیس اتفاق می‌افتد و اگر کمتر از ۵۵ درصد باشد، تبلور در سیستم آلایت - نفلین اتفاق می‌افتد. پس این موضوع حل می‌شود که چرا کوارتز و نفلین در طبیعت با هم دیده نمی‌شوند. زیرا با هم واکنش می‌دهند و ترکیب حد واسطی بانام آلایت تولید می‌کنند. اگر سنگ ما غنی از SiO_2 باشد ترکیب آن آلایت سیلیس است و اگر سنگ ما تحت اشباع (آلکالی یا فوق آلکالی) باشد ترکیب آن آلایت - نفلین است.



◀ دیگرام‌های دوتایی با نقطه واکنشی:

✓ این سیستم‌ها دارای یک ترکیب واکنشی اند، مثلاً:

سیستم لوسیت - سیلیس با ترکیب واکنشی پتاسیم فلدسپات

سیستم الیوین (از نوع فورستریت) - سیلیس با ترکیب واکنشی انستاتیت

✓ پس ترکیباتی که ذوب و تبلور ناسازگار دارند در این سیستم‌ها جای می‌گیرند.

✓ در این سیستم‌ها منحنی سالیدوس و لیکوئیدوس و نقطه یوتکتیک را داریم و یک نقطه به اسم C یا نقطه واکنشی هم داریم.

❖ سیستم دوتایی لوسیت - سیلیس با ترکیب واکنشی پتاسیم فلدسپات:

✓ این سیستم را به چند محدوده تقسیم می‌کنیم:

(۱) محدوده اول ترکیباتی که بین محور لوسیت و پتاسیم فلدسپات قرار می‌گیرند.

در این محدوده دمای نهایی تبلور و شروع ذوب، نقطه واکنشی است (Tc)

برای بررسی روند تبلور ترکیب F از این نقطه بر لیکوئیدوس عمود می‌کنیم. ادامه این خط تا خط ترکیب پایین می‌آید. در نقطه F لوسیت متبلور می‌شود. در مسیر F تا C هم لوسیت متبلور می‌شود. در نقطه C (نقطه واکنشی) دما ثابت است و لوسیت با مایع واکنش می‌دهد و به پتاسیم فلدسپات می‌شود. میزان لوسیت باقی‌مانده در نقطه C بستگی به ترکیب اولیه سیستم دارد. هرچه قدر ترکیب به محور لوسیت نزدیک‌تر باشد در پایان تبلور لوسیت بیشتری باقی می‌ماند و هر چه ترکیب به پتاسیم فلدسپات نزدیک‌تر باشد در پایان تبلور لوسیت کمتری باقی می‌ماند.

نقطه D: ترکیب D دقیقاً منطبق بر محور پتاسیم فلدسپات است پس در نقطه C تمام لوسیت به پتاسیم فلدسپات تبدیل می‌شود. جدا کردن لوسیت قبل از پایان تبلور، دما و ترکیب نهایی را تغییر می‌دهد.

بررسی روند ذوب در محدوده اول:

جامد F را در نظر می‌گیریم. شروع ذوب نقطه واکنشی است یعنی جامد F را آن قدر حرارت می‌دهیم تا دمایش به دمای نقطه C برسد. در شروع پتاسیم فلدسپات به صورت ناسازگار در نقطه C ذوب شده و تبدیل به لوسیت و مایع غنی از سیلیس می‌شود. دما در این نقطه ثابت می‌ماند تا تمام پتاسیم فلدسپات ذوب شود. در مسیر C تا F دما زیاد می‌شود و تمام لوسیت ذوب و ۱۰۰ درصد مایع می‌شود.

«از درصد ذوب بخشی کم جامد F ماگمای غنی از سیلیس به دست می‌آید»

(۲) محدوده دوم ترکیبات بین محور پتاسیم فلدسپات و نقطه C:



هر ترکیبی که در این محدوده قرار گیرد دمای شروع ذوب و پایان تبلورش نقطه A یا (یوتکتیک) است.

نقطه H : مایع را سرد می‌کنیم تا در محل برخورد (R) لوسیت متبلور می‌شود. کاهش دما به سمت A است و قبل از آن به نقطه C می‌رسد در نقطه واکنشی (C) لوسیت با مایع واکنش می‌دهد و 100 درصد به پتاسیم فلدسپات تبدیل می‌شود. در این نقطه دما ثابت مانده تا تمام لوسیت به پتاسیم فلدسپات تبدیل شود (به صورت ناسازگار). بعد از این مرحله دما کم می‌شود تا A . از C تا A پتاسیم فلدسپات به صورت سازگار متبلور می‌شود. در نقطه A به طور همزمان پتاسیم فلدسپات و تریدیمیت متبلور می‌شود و دما ثابت می‌ماند تا تمام جامد به پتاسیم فلدسپات و تریدیمیت تبدیل شود (به طریق سازگار)

پس تبلور پتاسیم فلدسپات در سه محل انجام می‌شود:

- (۱) در نقطه C به صورت ناسازگار
- (۲) در مسیر C تا A به صورت سازگار
- (۳) در نقطه A که آن هم به صورت سازگار است.

بررسی روند ذوب در محدوده دوم:

نقطه شروع ذوب نقطه A است. ترکیب ما H است. ادامه می‌دهیم تا لیکوئیدوس را قطع کند و پایش هم محل برخورد با لیکوئیدوس است (R) .

در نقطه A همزمان پتاسیم فلدسپات و تریدیمیت شروع به ذوب می‌کنند و دما در این نقطه ثابت می‌ماند تا تمام تریدیمیت و مقداری از پتاسیم فلدسپات ذوب شود. بعد دما به سمت C افزایش می‌یابد. از A تا C پتاسیم فلدسپات به صورت سازگار ذوب می‌شود اما در نقطه C این ذوب ناسازگار و تبدیل به لوسیت و مایع غنی از سیلیس می‌شود. تا زمانی که تمام پتاسیم فلدسپات به لوسیت می‌شود دما ثابت می‌ماند. در ادامه در مسیر C تا R لوسیت ذوب می‌شود.

(۳) محدوده سوم ترکیبات بین نقطه C تا نقطه A :

برای این ترکیبات نقطه شروع ذوب و پایان تبلور نقطه A است.

مایع Y : با کم شدن دما در نقطه Z پتاسیم فلدسپات متبلور می‌شود. تا نقطه A و در نقطه A همزمان تریدیمیت و پتاسیم فلدسپات تشکیل می‌شوند.

بررسی روند ذوب در محدوده سوم:

در نقطه A همزمان پتاسیم فلدسپات و تریدیمیت ذوب می‌شوند تا تمام تریدیمیت ذوب شود سپس حرکت می‌کند به سمت C تا تمام پتاسیم فلدسپات تماماً ذوب شود.



۴) محدوده چهارم ترکیبات بین نقطه A و محور SiO_2 :

مایع W: از W عمود می‌کنیم تا لیکوئیدوس را در نقطه N قطع کند. در این نقطه کریستوبالیت (کوارتز حرارت بالا) تشکیل می‌شود. از N به سمت A کوارتز متبلور می‌شود (چون دما کم می‌شود) سپس ابتدا کریستوبالیت و بعد در دمای 1470°C کریستوبالیت تبدیل به تریدیمیت می‌شود. در نقطه A همزمان تریدیمیت و پتاسیم فلدسپات متبلور می‌شوند.

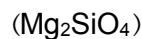
بررسی روند ذوب در محدوده چهارم:

جامدی با ترکیب W نقطه شروع تبلورش A است. عمود می‌کنیم تا لیکوئیدوس را در نقطه N قطع کند. در نقطه A همزمان تریدیمیت و پتاسیم فلدسپات ذوب می‌شوند که پتاسیم فلدسپات کاملاً ذوب می‌شود و دما ثابت می‌ماند تا تمام پتاسیم فلدسپات و مقداری تریدیمیت ذوب شود. در مسیر A تا L تریدیمیت ذوب شده و در L و در دمای 1470°C ابتدا تریدیمیت باقی‌مانده به کریستوبالیت تبدیل می‌شود سپس کریستوبالیت باقی‌مانده از L تا N ذوب می‌شود.

❖ سیستم دوتایی Mg_2SiO_4 و SiO_2 با ترکیب واکنشی انستاتیت:

این سیستم به دو سیستم دوتایی ساده تبدیل می‌شود:

۱) محدوده اول که شامل یک سیستم دوتایی ساده بین پریکلاز (MgO) و فورستريت



۲) و محدوده دوم شامل یک سیستم دوتایی با ترکیب واکنشی بین فورستريت و SiO_2 که

ترکیب حد واسط انستاتیت (MgSiO_3) است.

اگر مقدار SiO_2 کمتر از ۴۲ درصد باشد ترکیب در سیستم دوتایی ساده پریکلاز - فورستريت قرار می‌گیرد.

در اسکارن‌های منیزیم دار می‌توان پریکلاز و فورستريت را با هم مشاهده کرد.

به علت اینکه پریکلاز دمای ذوب بالایی دارد از آن در صنایع دیرگداز و نسوز استفاده می‌شود و چون در طبیعت به صورت کانسار اصلی زیاد یافت نمی‌شود به شکل فرعی از منیزیت MgCO_3 که مهم‌ترین منبع آن است به دست می‌آید.

ترکیباتی که SiO_2 بیشتر از ۴۲ درصد داشته باشند در محدوده سیستم دوتایی با ترکیب واکنشی انستاتیت قرار می‌گیرند و در صورتی که SiO_2 بین ۴۲ تا ۵۹/۵ باشد نقطه شروع ذوب و پایان تبلور P است.

بررسی روند تبلور:



از f عمود بر لیکوئیدوس می کشیم و ادامه می دهیم و ادامه مسیر را تا P می آییم از محل برخورد تا نقطه P فورستریت متبلور می شود. در این نقطه دما ثابت مانده و فورستریت به انستاتیت تبدیل می شود. هرچه محور f به a نزدیک تر باشد فورستریت کمتر و انستاتیت بیشتر است و روی محور a که منطبق بر انستاتیت است تمام فورستریت تبدیل به انستاتیت می شود. همچنین جدایش فورستریت قبل از نقطه واکنشی باعث غنی شدن ماگما از سیلیس می شود.

روند ذوب:

به سمت بالا ابتدا در نقطه P انستاتیت ذوب ناسازگار شده و به فورستریت + مایع تبدیل می شود. از مایع f با درصد ذوب بخشی کم مایع غنی از سیلیس ایجاد می شود و در ادامه در مسیر P تا f فورستریت ذوب می شود.

محدوده دوم (انستاتیت):

برای این مسیر مایع f را در نظر می گیریم:

ابتدا در نقطه برخورد با لیکوئیدوس فورستریت تشکیل شده و بعد در ادامه مسیر در نقطه P تمام فورستریت به انستاتیت تبدیل می شود. از نقطه P تا e دما ثابت بوده و کریستوبالیت و پروتوانستاتیت متبلور می شود.

روند ذوب عکس مراحل بالا صورت می گیرد.

(۱) ذوب پروتوانستاتیت و کریستوبالیت

(۲) ذوب عادی انستاتیت

(۳) در نقطه P ذوب ناسازگار انستاتیت باعث ایجاد فورستریت + مایع می شود.

(۴) در مسیر P تا f فورستریت ذوب می شود.

محدوده سوم (بین P و SiO_2):

نقطه پایان تبلور و شروع ذوب نقطه e (یوتکتیک) است که واکنشی نیست و مثل سیستم دوتایی ساده است.

در این نمودار از Mg_2SiO_4 تا نقطه P شامل سنگ های تحت اشباع و از نقطه P تا SiO_2 شامل سنگ های فوق اشباع می شود.

✓ خصوصیات مهم سیستم دوتایی پریکتیک یا دوتایی با ترکیب واکنشی:

(۱) برخلاف سیستم های دوتایی ساده که دمای نهایی تبلور و شروع ذوب ثابت و مشخص است (یوتکتیک) در این سیستم ها دمای نهایی تبلور و شروع ذوب متغیر و تابع ترکیب اولیه سیستم است.

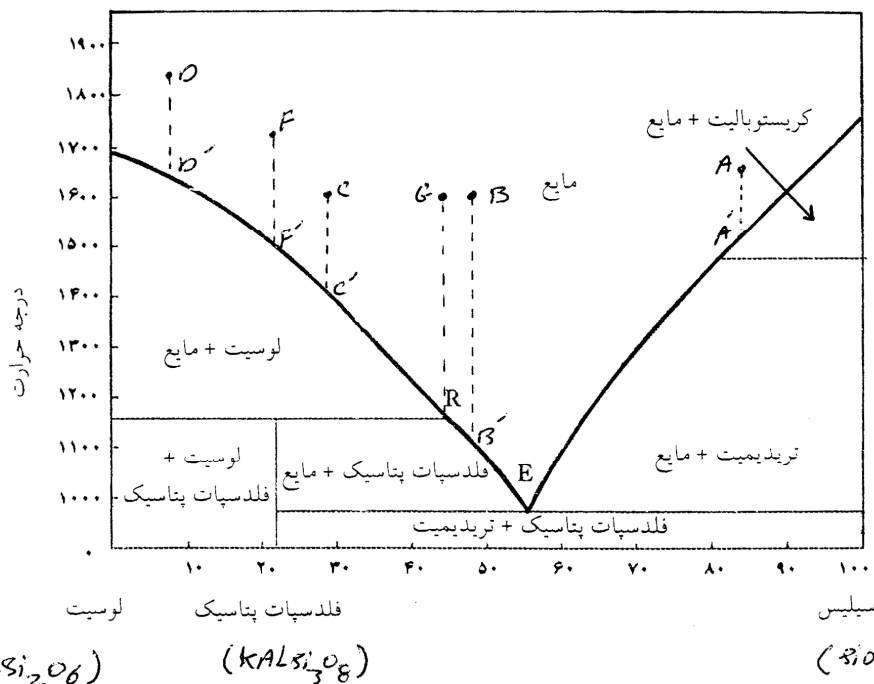


- ۲) در سنگ‌هایی که دمای شروع ذوب آن‌ها نقطه واکنشی است (P) ابتدا یک کانی به صورت ناسازگار ذوب می‌شود.
- ۳) تفریق کانی متبلور شده قبل از نقطه واکنشی تغییرات مهمی در ترکیب و دمای نهایی سیستم ایجاد می‌کند.
- ۴) در شرایط تبلور تعادلی، دو کانی که در دو طرف یک سیستم هستند در یک سنگ دیده نمی‌شوند.
- ۵) از ذوب سنگ‌های اولترامافیک حاوی انستاتیت و الیوین فورستريت با درصد ذوب بخشی کم می‌توان ماگمای غنی از سیلیس به دست آورد.

- ✓ نکته: در نمونه‌هایی که ذوب متناقض یا ناجور است نقطه‌ای به نام نقطه واکنشی یا تحولی یا اُبرگانگ که آن را نقطه پرتکتیک گویند (P یا R).
- ✓ نکته: در دیاگرام‌های دوتایی ساده ترکیب اولیه با ترکیب نهایی تبلور از ذوب یکسان است ولی در دیاگرام‌های واکنشی ترکیب اولیه یا نهایی تبلور یا ذوب یکسان نیست.
- ✓ تذکر: در این دیاگرام‌ها بین R و E، ذوب جور یا عادی را داریم.

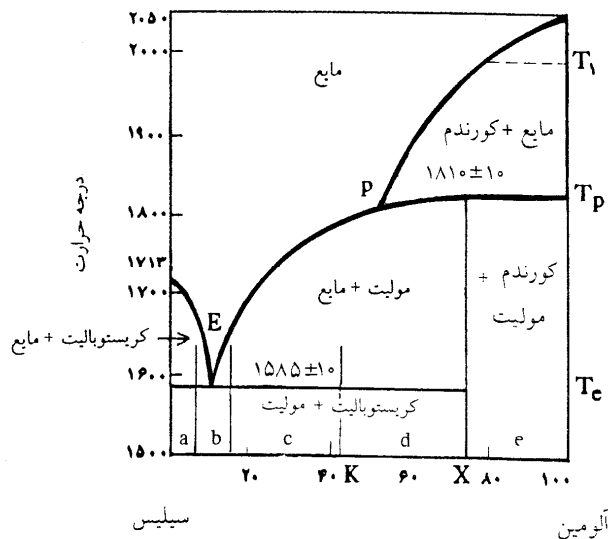
✓ تمرین اول (سیستم سیلیس - لوسیت):

- ۱- در AA' : تبلور ترکیبات بین E و SiO_2 \Leftarrow نقطه نهایی تبلور E است.
- ۲- در BB' : تبلور ترکیبات بین E و R \Leftarrow نقطه نهایی تبلور E است.
- ۳- در CC' : تبلور ترکیبات بین R و دیواره حد واسط \Leftarrow نقطه نهایی تبلور E است.
- ۴- در FF' : تبلور ترکیبات روی دیواره حد واسط \Leftarrow نقطه نهایی تبلور R است.
- ۵- در DD' : تبلور ترکیبات بین L و دیواره حد واسط \Leftarrow نقطه نهایی R است.
- ۶- در GR : تبلور ترکیبات روی R یا P \Leftarrow نقطه نهایی E است.



✓ تمرین دوم (سیستم سیلیس - آلومین در فشار یک بار):

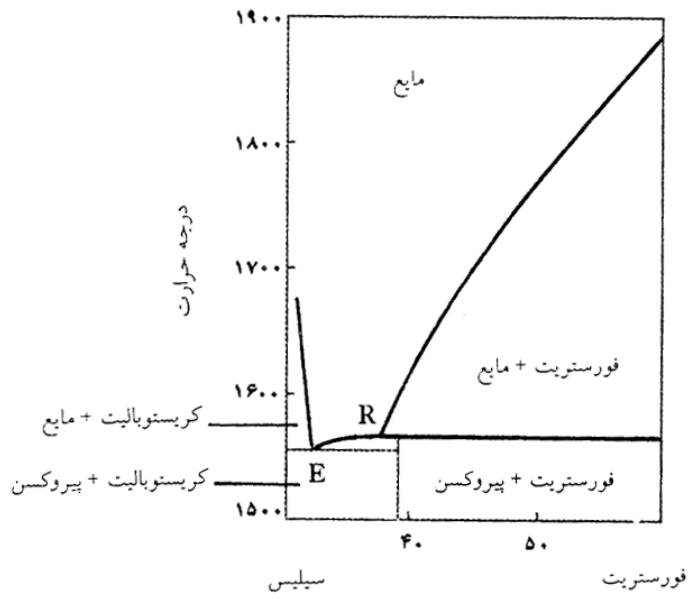
- در حرارت بالا در قطب Si، کریستوبالیت یا تری‌دیمیت و در قطب Al_2O_3 ، کورندون متبلور می‌شود. (حد واسط مولیت = $3Al_2O_3, 2SiO_2$)



✓ تمرین سوم (سیستم سیلیس - فورستریت):

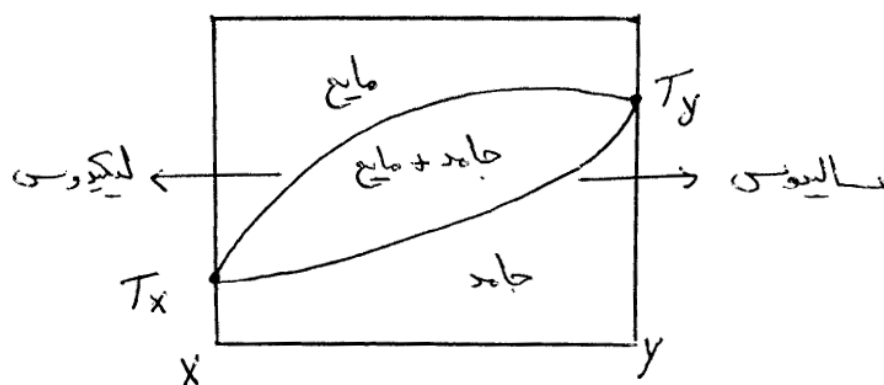
- در قطب SiO_2 سیلیس و در قطب Mg_2SiO_4 فورستریت را داریم (حد واسط انستاتیت = $MgSiO_3$)

نکته: در فشارهای ۳ تا ۵ کیلو بار انستاتیت به حالت طبیعی ذوب می‌شود.



◀ دیاگرام‌های دوتایی محلول جامد

- نکته: کانی‌هایی با هم تشکیل محلول جامد می‌دهند که ۱- اختلاف شعاع یونی کمتر از ۲۰/۱۵- اختلاف بار الکتریکی کمتر از یک باشد.
 - این دیاگرام منحنی لیکیدوس (مایع) و سالیدوس (جامد) دارد.
 - تفسیر پدیده زونینگ با این منحنی امکان‌پذیر است.
 - این دیاگرام فاقد نقطه یوتکتیک یا E است.
 - همه واکنش‌ها در آن تعادلی می‌باشند.
 - پدیده زونینگ یا زوناسیون:
 - عوامل مؤثر بر زونینگ:
- ۱- تغییر فشار بخار آب (آذرین خروجی)
 - ۲- سرد شدن سریع ماگما (خروجی‌ها)
 - ۳- اختلاط دو ماگما
 - ۴- اختلاط ماگما با دیواره
 - ۵- تغییر میزان غلظت ماگما (SiO_2).
- در دیاگرام‌های آن چون مایع باقیمانده در محفظه همچنان وجود دارد، کلیه واکنش‌ها غیر تعادلی است.





سیستم‌های دوتایی با انحلال جامد کامل:

موادی در این سیستم‌ها هستند تبلور یکسان داشته و از نظر شعاع و بار یونی قابلیت جایگزینی داشته باشند. (مثل آلپیت و آنورتیت با محلول جامد پلاژیوکلاز) و یا فورستریت و فیالیت با محلول جامد الیوین).

سیستم فورستریت (Mg_2SiO_4) - فیالیت (Fe_2SiO_4) با محلول جامد الیوین: در این سیستم تمام قسمت‌ها شبیه پلاژیوکلازها است، تفریق ذوب و زونینگ ولی شکل منحنی آن برعکس است. در سنگ‌های اولترابازیک و بازیک الیوین از نوع فورستریت است. در سنگ‌های حد واسط الیوین از نوع فیالیت است. الیوین سنگ‌های بازیک Mg و الیوین سنگ‌های حد واسط از نوع Fe است.

سیستم آلپیت و آنورتیت با محلول جامد پلاژیوکلاز: پلاژیوکلازهای اسیدی از نوع Na و پلاژیوکلازهای بازی از نوع Ca است. (لابرادوریت و آنورتیت) در این سیستم Na و Ca قابلیت جابجایی دارند. در این سیستم‌ها فقط دو منحنی سالیدوس و لیکوئیدوس داریم. تغییرات دما و ترکیب روی منحنی لیکوئیدوس و تغییرات فاز جامد روی منحنی سالیدوس اتفاق می‌افتد.

مثال: مایع a (۶۵ درصد آنورتیت و ۳۵ درصد آلپیت):

از a به هر دو منحنی عمود می‌کنیم در برخورد با لیکوئیدوس (F) اولین جامد تشکیل می‌شود. برای تشخیص اینکه این جامد چه ترکیبی دارد از F به سالیدوس عمود می‌کنیم (G) که ۹۰ درصد آنورتیت و ۱۰ درصد آلپیت دارد خط عمود اول در نقطه a سالیدوس را قطع می‌کند که از آن بر لیکوئیدوس عمود می‌کنیم تا مایع را مشخص کنیم.

F و D و H به ترتیب مایعاتی اند که تشکیل می‌شوند و با پلاژیوکلاز در تعادل اند. E و G و a به ترتیب پلاژیوکلازهایی هستند که تشکیل می‌شوند و جامدند. قانون اهرم‌ها برای بررسی درصد فاز جامد و مایع استفاده می‌شود.

نقطه a:

همه را نسبت به خط ترکیب می‌سنجیم: برای شروع نقطه f را بررسی می‌کنیم. هر چیزی قبل از خط ترکیب است، مایع و هر چیزی بعد از خط ترکیب است مایع است. پس در نقطه f صد درصد مایع داریم.



نقطه d:

$$100 = (ce \div de) * 100 = \text{فاز مایع} * 100 = (cd \div de) = \text{فاز جامد}$$

نقطه h: در این نقطه صد درصد جامد داریم.

بررسی نحوه ذوب در سیستم دوتایی آلپیت - آنورتیت:

جامد a با ترکیب ۶۵ درصد آنورتیت و ۳۵ درصد آلپیت را بررسی می‌کنیم. از این نقطه خط عمودی به سمت بالا رسم کرده تا سالیدوس و لیکوئیدوس را قطع کند. در نقطه A ذوب شروع می‌شود. اولین مایعی که تشکیل می‌شود H است پس جامد A با مایع H در تعادل است. آخرین مایعی که تشکیل می‌شود F است که با جامد G در تعادل است.

◀ خصوصیات مهم سیستم‌های دوتایی با انحلال جامد کامل:

- ۱) دمای شروع ذوب و تبلور برای ترکیبات مختلف متفاوت بوده و بستگی به ترکیب اولیه دارد. در ضمن دما با تغییر فشار خشک و مرطوب تغییر می‌کند.
- ۲) دمای نهایی تبلور بستگی به نحوه تبلور دارد. در تبلور غیر تعادلی دمای نهایی به میزان زیاد کاهش می‌یابد.
- ۳) در هر لحظه از زمان تبلور، حذف فاز جامد از سیستم، دما و ترکیب نهایی را عوض می‌کند.
- ۴) از ذوب بخشی سنگ‌های حاوی پلاژیوکلاز و الیوین، با تغییر در میزان درصد ذوب ترکیبات متفاوت ایجاد می‌شود.
- ۵) در مرحله نهایی از دو مایع با ترکیب مختلف فقط یک فاز جامد متبلور می‌شود (پلاژیوکلاز یا الیوین) که پلاژیوکلازها در سنگ‌های اسیدی، حد واسط، بازیک و اولترابازیک دیده می‌شود یعنی در تمام سنگ‌های آذرین دیده می‌شود. نوع پلاژیوکلاز یا الیوین توسط ترکیب سنگ کنترل می‌شود.



سیستم‌های دوتایی با انحلال جامد محدود (Solid Solution محدود):

یون‌ها توانایی جانشینی به صورت ۱۰۰ درصد را ندارند. مواد ایزومورف و هترومورف که شعاع کاتیون آن‌ها در حدی است که قابلیت جانشینی به صورت ۱۰۰ درصد را نداشته باشند تشکیل سیستم دوتایی با انحلال جامد محدود می‌دهند. مثلاً اوزیت و هیپرستن و جانشینی بین یون‌های Ca و Mg و Fe این‌ها سیستم دوتایی با انحلال جامد محدود را تشکیل می‌دهند. این دو سیستم شبیه به هم می‌باشند.

✓ آلکالی فلدسپات:

در سیستم‌های دوتایی با انحلال جامد محدود منحنی سالووس، منحنی جدایی در فاز جامد است.

در فشار یک اتمسفر در ساختمان پتاسیم فلدسپات حداکثر ۶۵ درصد آلپیت جانشین می‌شود و برعکس در ساختمان سدیم فلدسپات حداکثر ۳۵ درصد ارتوز با پتاسیم فلدسپات جانشین می‌شود. به دلیل کوچک‌تر بودن شعاع یونی سدیم مقدار بیشتری آلپیت در شبکه پتاسیم فلدسپات جانشین می‌شود.

در مرحله نهایی تبلور برای ترکیبات واقع بین نقطه مینیمم (m) و محور پتاسیم فلدسپات، آلکالی فلدسپات از نوع ارتوز است (پتاسیک) و برای ترکیباتی که بین نقطه m و محور سدیم فلدسپات اند، آلکالی فلدسپات از نوع آلپیت خواهد بود (سدیک). در اعماق کم و فشار ۱ اتمسفر فقط یک آلکالی فلدسپات متبلور می‌شود (یا آلپیت یا ارتوز)

در صورت سرد شدن این مایع به علت اختلاف در شعاع یونی به فلدسپات سدیک و پتاسیک تفکیک می‌شود. به این فرایند جدایی در فاز جامد یا (Exolution) می‌گویند. این جدایش زیر منحنی سالیدوس اتفاق می‌افتد و تشکیل بافت پرتیت و آنتی پرتیت می‌دهد.

در پتاسیم فلدسپات (در ارتوز) که مقدار آلپیت آن از ۲۵ درصد کمتر باشد و در سدیم فلدسپاتی که (در آلپیت) که مقدار ارتوز آن از ۷ درصد کمتر باشد، جدایش اتفاق نمی‌افتد چون در محدوده سالووس قرار نمی‌گیرد.



✓ پرتیت و آنتی پرتیت:

اگر آلکالی فلدسپات اول (زمینه) از نوع پتاسیک باشد و آلپیت از آن به اشکال و اندازه‌های مختلف جدا شود به آن پرتیت و برعکس آن را آنتی پرتیت گویند.

بر اساس اندازه و سرعت سرد شدن سه نوع پرتیت داریم:

(۱) پرتیت اشعه X

(۲) کریتوپرتیت (میکروسکپی)

(۳) ماکروپرتیت (ماکروسکپی)

در سنگ‌های آتش‌فشانی به دلیل سرد شدن سریع سنگ پرتیت و آنتی پرتیت نوع اول و دوم داریم. فلدسپاتی که در سنگ‌های آتش‌فشانی دیده می‌شود ساندین است.

پرتیت در ساندین از نوع اشعه X کریتو است و در ارتوز، کریتو یا ماکرو ارتوزی که در سنگ‌های آذرین درونی تبلور شده، پرتیت از نوع کریتو و به ندرت ماکرو خواهد بود.

میکروکلین به دلیل تبلور در اعماق زیاد، پرتیت از نوع ماکرو دارد. تغییرات این سیستم در فشارهای خشک و مرطوب را در تصویر مشاهده می‌کنید.

اولین منحنی (dP) یعنی خشک و فشار یک اتمسفر

با افزایش بخار آب درجه حرارت (سالیدوس و لیکوئیدوس) کاهش می‌یابد.

محدوده پایداری لوسیت کاهش می‌یابد. در فشار یک کیلو بار دما باز کاهش پیدا می‌کند و لوسیت کمتر می‌شود

ترکیب نقطه مینیمم به سمت آلپیت می‌رود.

در فشار ۲ کیلو بار، کاهش دما، حرکت نقطه مینیمم و کاهش لوسیت

در فشار ۳ کیلو بار لوسیت حذف می‌شود.

در فشار ۲/۵ کیلو بار مرطوب، ذوب پتاسیم فلدسپات عادی می‌شود.

در فشار ۴ کیلو بار باز هم افت دما حرکت به سمت آلپیت و حذف لوسیت را داریم

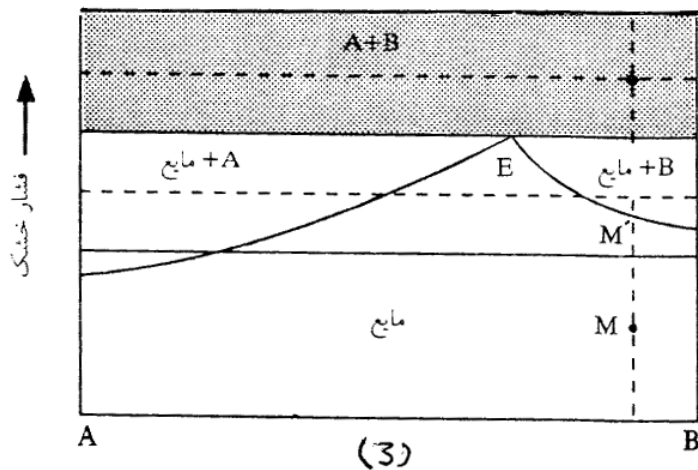
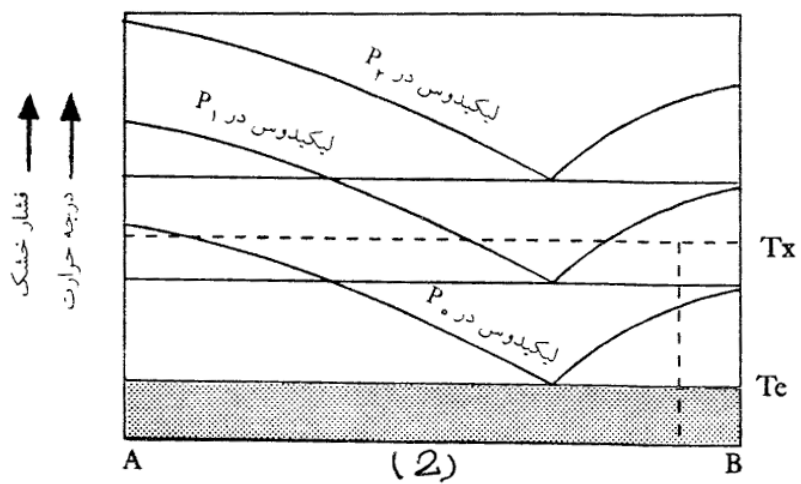
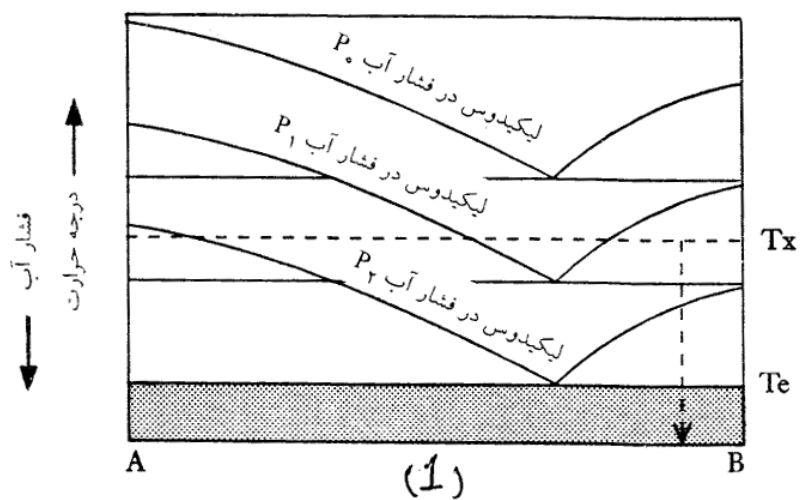
در فشار ۵ کیلو بار مرطوب، منحنی سالووس و سالیدوس یکدیگر را قطع می‌کنند و تشکیل سیستم دوتایی انحلال جامد محدود با نقطه یوتکتیک می‌دهد.

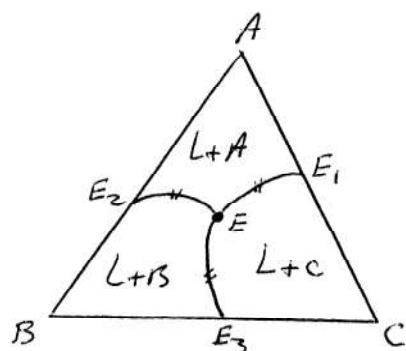
در ۵ کیلو بار یعنی شرایط عمیق در تشکیل توده‌های آذرین، شروع ذوب و تبلور از نقطه یوتکتیک است.



* نکات:

- نقطه اتکتیک یا یوتکتیک $E \leftarrow$ درجه آزادی $V=0$
- در نقطه E به علت ناخالص بودن، دمای ذوب یا تبلور پایین تر از حد طبیعی است.
- با افزایش فشار (P) سطح لیکیدوس افت می کند.
- در درجه حرارت ثابت و فشار متغیر (فشار خشک) منحنی های لیکیدوس و نقطه اتکتیک معکوس می شود.
- منحنی سولوس قلمرو سری پیوسته حرارت بالا و سری ناپیوسته حرارت پایین را از هم جدا می کند.
- پرتیت: معادل سانیدین حرارت پایین
- آنتی پرتیت: معادل آنورتوز حرارت پایین
- محلولهای جامد (با توجه به ساختمان بلورین):
 - محلول جامد بین ذره ای: اتمها در فضای بین شبکه ای (فلزات).
 - محلول جامد حذف شده یا ناقص: فقدان بعضی از اتمها (پیروتیت).
- در سیستم های دو تشکیل دهنده بدون محلول جامد، فشار در نظر گرفته نمی شود (کندانسه)
- در هر سیستم دوتایی درجه حرارت ذوب یا انجماد در نقطه اتکتیک پیوسته ثابت است.
- در نقطه اتکتیک مقدار کاهش درجه حرارت با مقدار ناخالصی نسبت مستقیم و با درجه حرارت ذوب نسبت عکس دارد.
- فشار خشک باعث بالا رفتن درجه حرارت تشکیل دهنده ها مخلوط آنها می گردد.
- با افزایش فشار آب، درجه حرارت پایین می آید، در فشارهای بالاتر این روند کند می شود.
- تغییرات لیکیدوس و درجه حرارت نقطه اتکتیک E در حالتی که فشار آب تغییر کند.
- همان تغییرات وقتی که فشار بدون حضور آب و به اصطلاح فشار خشک باشد.
- اگر درجه حرارت ثابت و فشار متغیر باشد، منحنی های لیکیدوس و نقطه اتکتیک معکوس می شود.



سیستم‌های سه تایی: (C=3) 

- سیستم‌های سه تایی از سه ترکیب متفاوت تشکیل شده اند.
- فاز دیاگرام این سیستم‌ها به شکل یک مثلث متساوی‌الاضلاع است که روی هر رأسش یک ترکیب قرار گرفته. مقدار هر ترکیب در همان رأس برابر ۱۰۰ و روی ضلع مقابل صفر است.
- دارای خطوط حرارتی یا ایزوترم (//) است.
- در رأس، یک سازنده، اضلاع، دو سازنده و در داخل مثلث برای هر نقطه سه سازنده وجود خواهد داشت.
- برای اینکه ترکیب یک ماده داخل مثلث را تعیین کنیم ابتدا یک خط افقی از A به موازات ضلع پایین رسم می‌کنیم. سپس از همین نقطه یک خط دیگر به موازات یکی دیگر از اضلاع مثلث رسم می‌کنیم. در این حالت مثلث به سه محدوده تقسیم می‌شود.
- یک سیستم سه تایی ساده از سه سیستم دوتایی ساده تشکیل می‌شود. هر سیستم دوتایی ساده یک نقطه یوتکتیک دارد؛ بنابراین سه نقطه یوتکتیک داریم که در یک نقطه مثلث یکدیگر را قطع می‌کنند. یعنی پایین‌ترین نقطه تبلور و شروع ذوب.
- بعضی جاها به این نقطه کوتکتیک هم گفته می‌شود.
- نقطه‌ای بنام اتکتیک سه تایی یا کوتکتیک E دارند.
- قانون فازها در سیستم سه تایی:

$$F = C - P + 1$$

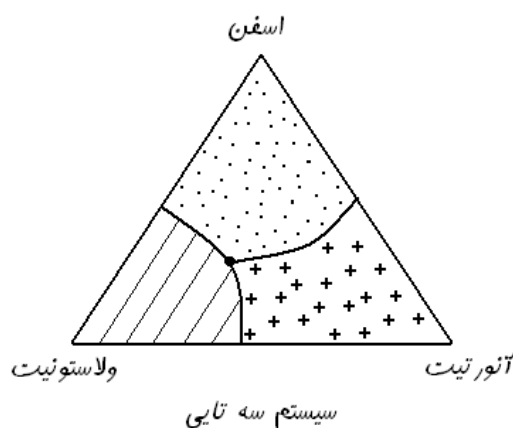
- در این سیستم‌ها دما در بعد سوم نشان داده می‌شود. برش‌های ایزوترم یا هم‌دما در این سیستم‌ها به شکل خطوط توپوگرافی دیده می‌شود.
- درجه آزادی در نقطه یوتکتیک:

$$F = C - P + 1 \rightarrow 0 = 3 - P + 1 \rightarrow P = 4$$

- در سیستم‌های سه تایی همزمان ۴ فاز با هم در تعادلند، سه فاز جامد و یک مایع
- در این سیستم‌ها روی منحنی‌های یوتکتیک ۲ کامپوننت داریم.

$$F = C - P + 1 \rightarrow 1 = 2 - P + 1 \rightarrow P = 2$$

- روی منحنی‌های یوتکتیک در هر لحظه دو فاز متبلور یا ذوب می‌شوند.
- فرمول فازها ($C=3$) در آن‌ها معادل سیستم‌های دو تایی است.
- فرمول فازها ($C=3$) $V + P = C + 1$
- در نقطه E: $V=0 \leftarrow 3+1=V+4, (A+B+C+Liquid)$



مهم‌ترین سیستم‌های سه تایی:

- (۱) سیستم سه تایی ساده
- (۲) سیستم ساده با ترکیب واکنشی
- (۳) سیستم سه تایی با انحلال جامد کامل
- (۴) سیستم سه تایی با انحلال جامد محدود

- قانون اهرم‌ها در سیستم‌های سه تایی ساده:
برای مشخص شدن مسیر تبلور عمود می‌کنیم به رأس مربوطه و ادامه می‌دهیم تا منحنی کوتکتیک را قطع کند.

- ترکیب A در نقطه B:

$$A \text{ در نقطه B} = (AB \div BC) \times 100 = \text{درصد فاز جامد در نقطه B برای ترکیب A}$$

$$A \text{ در نقطه C} = (AC \div BC) \times 100 = \text{درصد فاز مایع در نقطه C برای ترکیب A}$$

$$A \text{ در نقطه E} = (AE \div EF) \times 100 = \text{درصد فاز جامد در نقطه E برای ترکیب A}$$

$$A \text{ در نقطه F} = (AF \div EF) \times 100 = \text{درصد فاز مایع در نقطه F برای ترکیب A}$$

- بررسی روند تبلور در سیستم سه تایی آنورتیت - ولاستونیت - اکسید سیلیس:
از نقطه X به سمت A آنورتیت متبلور می‌شود.
در نقطه A همزمان با آنورتیت، تری‌دیمیت هم متبلور می‌شود.
از A به سمت E تری‌دیمیت و آنورتیت متبلور می‌شود.



در نقطه E همزمان هر سه فاز تریدیمیت، آنورتیت و ولاستونیت تشکیل می‌شوند در این نقطه دما ثابت می‌شود تا تمام مایع تبدیل به جامد شود.
تذکر: با تفریق یا جداسازی کانی‌های متبلور شده تغییری در دما و ترکیب نهایی ایجاد نمی‌شود چون دمای یوتکتیک ثابت و مشخص است.

▪ ذوب در سیستم‌های سه تائی ساده:

در این سیستم‌ها شروع ذوب نقطه یوتکتیک است.
جامد X را حرارت می‌دهیم. قبل از اینکه به نقطه یوتکتیک (شروع ذوب) برسد تغییرات پلی مورفیک اتفاق می‌افتد؛ مثلاً کوارتز α به کوارتز β و کوارتز β به تریدیمیت، ولاستونیت به ولاستونیت کاذب و آنورتیت به آنورتیت حرارت بالا تبدیل می‌شود.
در دمای E هر سه فاز همزمان شروع به ذوب می‌کنند که ولاستونیت کاملاً ذوب می‌شود چون از همه کمتر است. پس ولاستونیت به همراه مقداری از دو فاز دیگر ذوب می‌شود.
در مسیر E تا A تریدیمیت و آنورتیت ذوب می‌شوند. در نقطه A تمام تریدیمیت و مقداری از آنورتیت ذوب می‌شود.

در نهایت در مسیر A تا X باقی مانده آنورتیت ذوب می‌شود.
مذابی که به یوتکتیک نزدیک تر باشد سریع تر متبلور می‌شود و سنگ حاصل دانه ریز می‌شود و مذابی که با یوتکتیک فاصله دارد دیرتر متبلور شده و سنگ حاصل دانه درشت می‌شود.
در سنگ‌هایی که ترکیب آن‌ها به نقطه یوتکتیک نزدیک است در مقایسه با آن‌هایی که فاصله زیادی دارند درصد مذاب تولید شده در دمای ثابت یوتکتیک (E) بیشتر خواهد بود.
تغییرات در حجم و اندازه توده‌های نفوذی واقع در یک کمر بند را که هم سن بوده و ترکیب شیمیایی نزدیک به هم دارند می‌توان به متغیر بودن ترکیب سنگ مادر ربط داد. در توده‌های بزرگ ترکیب سنگ منشأ به دمای شروع ذوب نزدیک بوده در صورتی که در توده‌های کوچک ترکیب سنگ منشأ از نقطه شروع ذوب فاصله بیشتری دارد. ترکیب ماگمای اُسیدین و شیشه‌های طبیعی در محدوده یوتکتیک قرار دارد بنابراین قبل از رسیدن به سطح زمین هیچ تبلوری در آن رخ نمی‌دهد و در سطح زمین به سرعت سرد شده و تبدیل به شیشه می‌شوند.
ترکیباتی می‌توانند تشکیل سیستم سه تائی از نوع واکنشی دهند که دارای خاصیت ذوب ناسازگار داشته باشند.

▪ مهم ترین سیستم‌های سه تائی با ترکیب واکنشی:

- (۱) سیستم لوسیت - آنورتیت - سیلیس با ترکیب واکنشی پتاسیم فلدسپات
- (۲) سیستم آنورتیت - فورستریت - سیلیس با ترکیب واکنشی انستاتیت



▪ **سیستم لوسیت - آنورتیت - سیلیس:**

از پتاسیم فلدسپات خطی به آنورتیت رسم می کنیم در این صورت سیستم سه تائی ما به دو سیستم سه تائی تبدیل می شود.
 برای همه ترکیباتی که در مثلث آنورتیت - لوسیت - K فلدسپات (مثلث کوچک) قرار دارند نقطه پایان تبلور و شروع ذوب نقطه D (نقطه واکنشی) است.
 برای همه ترکیباتی که در مثلث آنورتیت - سیلیس - K فلدسپات (مثلث بزرگ) نقطه پایان تبلور و شروع ذوب نقطه C است که دمایش از D کمتر است. اینجا دیگر نقطه یوتکتیک نداریم.

▪ **بررسی تبلور مایع S:**

به رأس آنورتیت رسم می کنیم و ادامه می دهیم تا کوتکتیک را در نقطه R قطع کند. S در R متبلور می شود.
 از S تا R فقط آنورتیت متبلور می شود و در نقطه R آنورتیتو لوسیت همزمان با هم متبلور می شوند. از R تا D آنورتیت و لوسیت با هم متبلور می شوند. در نقطه D آنورتیت تشکیل شده و لوسیت با مایع واکنش انجام داده و تبدیل به پتاسیم فلدسپات می شود.
 ترکیب اولیه هرچه به محور لوسیت نزدیک تر باشد در نقطه D لوسیت بیشتری باقی می ماند و بر عکس.

▪ **بررسی تبلور مایع V:**

به رأس لوسیت رسم می کنیم و ادامه می دهیم تا کوتکتیک را در U قطع کند. از V تا U لوسیت متبلور می شود. در نقطه U لوسیت به صورت تبلور ناسازگار با مایع واکنش داده و به پتاسیم فلدسپات تبدیل می شود.
 باز هم مقداری لوسیت باقی می ماند. در نقطه D دما ثابت مانده و همزمان آنورتیت و پتاسیم فلدسپات و لوسیت متبلور می شوند.

▪ **بررسی تبلور مایع T:**

چون T در مثلث بزرگ قرار دارد دمای نهایی تبلور C است. این بار به رأس لوسیت رسم کرده و ادامه می دهیم. از T تا U لوسیت متبلور می شود. در U لوسیت تبدیل به پتاسیم فلدسپات شده (به صورت ناسازگار). از U تا D باز هم لوسیت تبدیل به پتاسیم فلدسپات می شود.
 چون T بعد از محور K فلدسپات است در نقطه D تمام لوسیت به پتاسیم فلدسپات تبدیل می شود. در این نقطه همزمان آنورتیت هم تشکیل شده و از D تا C آنورتیت و پتاسیم فلدسپات تشکیل



می شود پس در اینجا تبلور K فلدسپات در مسیر D تا C سازگار یا عادی است؛ و در نهایت در C همزمان آنورتیت، پتاسیم فلدسپات و تریدیمیت تشکیل می شوند.

▪ بررسی تبلور مایع A:

عمود می کنیم به رأس سیلیس و ادامه می دهیم. ابتدا از A کریستوبالیت تشکیل می شود. وقتی دما به 1470°C درجه رسید به تریدیمیت تبدیل می شود. در نقطه B تریدیمیت و آنورتیت متبلور می شوند و از B تا C هم تریدیمیت و آنورتیت تشکیل می شوند. در نقطه C همزمان تریدیمیت و آنورتیت و پتاسیم فلدسپات به صورت سازگار متبلور می شود و دما ثابت می ماند تا تمام مایع به جامد تبدیل شود. برای دو مایع S و V که نقطه پایان تبلور نقطه D است جداسازی بلورها (تفریق) باعث غنی شدن مایع باقی مانده از سیلیس می شود و تغییر در ترکیب نهایی می شود، به طوری که از D به سمت C دما کاهش می یابد.

▪ بررسی روند ذوب ترکیب S:

شروع ذوب نقطه D است. در D همزمان آنورتیت و پتاسیم فلدسپات ذوب می شود. در این نقطه ذوب ناسازگار پتاسیم فلدسپات ایجاد لوسیت می کند. پس از تبدیل کامل پتاسیم فلدسپات به لوسیت با افزایش دما در مسیر D تا R لوسیت و آنورتیت ذوب می شوند و از R تا S آنورتیت ذوب می شود.

▪ بررسی روند ذوب ترکیب T:

شروع ذوب نقطه C است. در این نقطه همزمان تریدیمیت، آنورتیت و پتاسیم فلدسپات ذوب می شوند ... دما در این نقطه ثابت می ماند تا تمام تریدیمیت و مقداری از پتاسیم فلدسپات و آنورتیت ذوب شود. سپس در مسیر C تا D آنورتیت و پتاسیم فلدسپات ذوب می شوند. در نقطه D همزمان پتاسیم فلدسپات و آنورتیت ذوب شده و ذوب ناسازگار پتاسیم فلدسپات ایجاد لوسیت می کند. از D تا U پتاسیم فلدسپات به طریق ناسازگار تبدیل به لوسیت می شود و از U تا T لوسیت ذوب می شود.

در نمودارهای بعدی دمای واکنشی برای مثلث کوچک تر B است و برای مثلث بزرگ تر E.

◀ سیستم های سه تایی با انحلال جامد کامل:

▪ سیستم دیوپسید - آنورتیت - آلپیت:

در این سیستم بین دیوپسید و آنورتیت یک سیستم دوتایی ساده است با نقطه یوتکتیک دمای 1275°C که با e نشان می دهند و بین دیوپسید و آلپیت هم یک سیستم دوتایی ساده است (دمای



نقطه یوتکتیک 1100°C است) از اتصال این دو نقطه یوتکتیک یک منحنی کوکتیک رسم می شود.

بین آلپیت و آنورتیت یک سیستم دوتایی با انحلال جامد کامل است.

بررسی روند تبلور A:

از A به رأس دیوپسید وصل می کنیم و ادامه می دهیم. در نقطه A و از A تا B دیوپسید متبلور می شود. از B تا F دیوپسید و پلاژیوکلاز با هم تشکیل می شود. برای به دست آوردن ترکیب پلاژیوکلاز از PF عمود می کنیم بر لیکوئیدوس و سالیدوس. از نقطه برخورد با لیکوئیدوس عمود می کنیم بر سالیدوس تا اولین پلاژیوکلاز به دست آید. از لیکوئیدوس عمود می کنیم بر سالیدوس P1 به دست می آید که همزمان با دیوپسید در نقطه B به وجود آمده است. برای به دست آوردن دما و ترکیب نهایی از PF خطی به موازات خط P1 - B رسم می کنیم که اسم آن را F می گذاریم که از B تا F پلاژیوکلاز تشکیل می شود.

در صورتی که تبلور تعادلی نباشد یعنی پلاژیوکلازها را همزمان با تبلور از سیستم جدا کنیم (تفریق) دما و ترکیب نهایی سیستم تغییر می کند؛ مثلاً در دمای H تمام پلاژیوکلاز و دیوپسید را از سیستم جدا می کنیم، مایع باقی مانده به عنوان یک ترکیب جدید شروع به تبلور می کند.

از H که مایعی جدید است وصل می کنیم به دیوپسید و ادامه می دهیم که در نقطه PE ضلع مقابل را قطع می کند. سپس PE را بر سالیدوس و لیکوئیدوس عمود کرده و مثل قبل عمل می کنیم که PH به دست می آید. از H به PH خط می کشیم و از PE به موازات PH خطی رسم کرده که در نقطه E قطع می شود پس از H تا E پلاژیوکلاز جدید تشکیل می شود و پایان تبلور در این محدوده است که اسیدی ترند یعنی آلپیت بیشتر و دما نسبت به F کمتر و ترکیب سدیک تر شد

▪ سیستم سه تائی سیلیس - نفلین - کلسالیت (ایزومورف نفلین):

این مثلث را به دو محدوده تقسیم می کنیم. محدوده بالا شامل سیلیس، آلپیت و ارتوز است که برای این ترکیبات نقطه نهایی تبلور M است. در این مثلث سنگ‌های اشباع از سیلیس قرار می گیرند.

با کاهش سیلیس وارد محدوده آلپیت، ارتوز، نفلین و کلسالیت می شویم. برای این ترکیبات دمای نهایی تبلور N است که محدوده سنگ‌های آلکالن (پرآلکالن) تحت اشباع است. در واقع خط آلپیت - ارتوز مرز بین سنگ‌های اشباع و تحت اشباع است.

در این نمودارها خطوطی که شبیه منحنی‌های توپوگرافی هستند برش‌های ایزوترم یا هم دما می باشند.

◀ سیستم سه تائی با انحلال جامد محدود بین آلپیت و ارتوز:

▪ سیستم سیلیس - آلپیت - ارتوز:

در این سیستم بین سیلیس - آلپیت و سیلیس - ارتوز سیستم دوتایی ساده داریم.

بین آلپیت و ارتوز سیستم دوتایی با انحلال جامد محدود داریم.



این نمودار در فشار استاندارد 1 atm رسم شده پس برای مطالعه سنگ‌های آتش‌فشانی اسیدی مناسب است. خطی که به صورت نقطه چین مشخص شده همان کوتکتیک است که در واقع دو نقطه یوتکتیک را به هم وصل می‌کند. در زیر خط کریستوبالیت - تریدیمیت، کریستوبالیت پایدار نیست.

روی کوتکتیک در هر لحظه همزمان با تریدیمیت یک آلکالی فلدسپات هم تشکیل می‌شود.

▪ بررسی روند تبلور A:

مایع A مسیر A - D را طی می‌کند تا به کوتکتیک برسد. در نقطه A آلکالی فلدسپات تشکیل می‌شود. برای به دست آوردن نوع آلکالی فلدسپات A را به D وصل کرده و ادامه می‌دهیم تا خط آلبیت ارتوز را در نقطه E قطع کند. اولین آلکالی فلدسپات است.

از A به رأس SiO₂ وصل می‌کنیم و ادامه می‌دهیم تا ضلع آلبیت - ارتوز را در نقطه B قطع کند. B آخرین آلکالی فلدسپات است. از B خطی به موازات DE رسم می‌کنیم تا کوتکتیک را در نقطه G قطع کند. G دمای نهایی است.

▪ بررسی روند تبلور H:

در این نقطه ابتدا لوسیت متبلور می‌شود. سپس با مایع واکنش داده و تشکیل آلکالی فلدسپات می‌دهد. H را به L وصل می‌کنیم و ادامه می‌دهیم تا این ضلع را در نقطه M قطع کند. پس اولین آلکالی فلدسپات است. برای به دست آوردن ترکیب نهایی از H به رأس SiO₂ وصل می‌کنیم و ادامه می‌دهیم تا ضلع آلبیت - ارتوز را در نقطه O قطع کند. برای به دست آوردن دمای نهایی از O خطی به موازات ML رسم می‌کنیم تا کوتکتیک را در نقطه N قطع کند. در واقع N دمای نهایی سیستم است.

▪ سیستم سه تایی سیلیس - آلبیت - ارتوز در فشار مختلف بخار آب:

در شکل A فشار بخار آب وجود ندارد.

در شکل B فشار 200 kg/cm² است یعنی 0.2 Kbar

در شکل C فشار بخار آب 4 Kbar است و به دلیل فشار زیاد بخار آب، کوارتز درجه بالا تشکیل شده است.

- محدوده لوسیت و تریدیمیت کم می‌شود.

- کریستوبالیت حذف می‌شود.

- کوارتز β زیاد می‌شود.



در شکل D و فشار 2 Kbar، تری‌دی‌میت حذف می‌شود. لوسیت کم می‌شود. کوارتز β و فلدسپات بیشتر می‌شوند.

در شکل E و فشار 3 Kbar، لوسیت حذف شده و کوارتز β زیاد می‌شود. فلدسپات هم همچنان وجود دارد.

در شکل F و فشار 3.5 Kbar، کوارتز α (دما پایین) شروع به تبلور می‌کند. محدوده کوارتز β کم می‌شود.

در شکل G و فشار 4 Kbar، کوارتز α زیاد و کوارتز β و فلدسپات کم می‌شوند.

در شکل H و فشار 6 Kbar، کوارتز α زیاد و کوارتز β کم می‌شود. فلدسپات تبدیل به سدیک و پتاسیک تبدیل می‌شود. در فشار حدود 5 Kbar منحنی سالی‌دوس و سالووس یکدیگر را قطع می‌کنند و همزمان دو نوع آلکالی فلدسپات متبلور می‌شود.

در فشار 10 Kbar کوارتز β حذف و فقط کوارتز α داریم و محدوده فلدسپات هم کم می‌شود. در ضمن دو نوع فلدسپات هم در حال تشکیل است.

▪ تأثیرات افزایش فشار بخار آب:

- کاهش دمای ذوب و تبلور

- ایجاد پلی مورفهای پایدارتر کوارتز و آلکالی فلدسپات

- افزایش محدوده کوارتز

- کاهش محدوده لوسیت (در فشار ۲/۵ تا ۳ کیلو بار لوسیت حذف می‌شود)

▪ توتل، باون و لوت گرانیته‌ها را به دو دسته تقسیم کردند:

(۱) هیپرسالووس: در این گرانیته‌ها یک نوع آلکالی فلدسپات متبلور می‌شود. پس فشار بخار

آب کمتر از 5 Kbar بوده و منحنی سالووس و سالی‌دوس یکدیگر را قطع نکرده

بودند. پس در این بافت‌ها پرتیت و آنتی پرتیت هم دیده می‌شود.

(۲) ساب سالووس: در این گرانیته‌ها دو نوع آلکالی فلدسپات متبلور می‌شود. یعنی فشار بخار

آب بیشتر از 5 Kbar بوده است؛ بنابراین سالووس و سالی‌دوس یکدیگر را قطع

کرده‌اند.

▪ سیستم آلبیت - ارتوز - سیلیس در فشار 5 Kbar:

در سیستم دوتایی در نقطه D همزمان ۲ آلکالی فلدسپات تشکیل می‌شود (A و B) در سیستم

سه تایی یک کامپوننت دیگر هم وجود دارد (SiO₂) یعنی ۳ عامل مؤثر است. دمای نقطه D از

نقطه C کمتر است.



دمای D را روی سیستم دوتایی با انحلال جامد کامل منتقل می‌کنیم. در این دما ۲ آلکالی فلدسپات E و F تشکیل شده است.

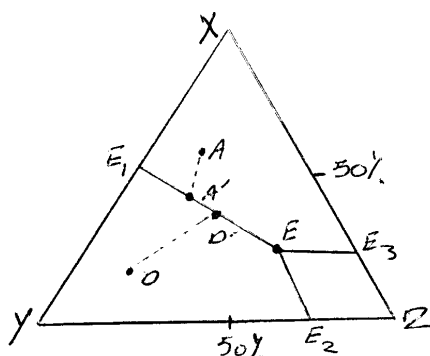
تمام نقاط A و B و E و F را روی خط بالا منتقل می‌کنیم (آلیت - ارتوز) در مثلث سیلیس - آلیت - E در نهایت کوارتز و سدیم فلدسپات متبلور می‌شود که بعداً ممکن است تشکیل آنتی پرتیت بدهد.

در مثلث سیلیس - ارتوز - F در نهایت کوارتز و یک نوع پتاسیم فلدسپات متبلور می‌شود و بعداً در یک حالت خاص ممکن است تشکیل پرتیت بدهد.

در مثلث سیلیس - E - F در هر لحظه کوارتز و ۲ نوع آلکالی فلدسپات تشکیل می‌شود. G و L را به هم وصل کرده و ادامه می‌دهیم تا این ضلع را در A قطع کند پس ترکیب G در نقطه A پتاسیم فلدسپات تشکیل می‌شود

در نقطه L پتاسیم فلدسپات K و A همزمان تشکیل می‌شود.

◀ دیاگرام‌های سه‌تایی ساده:



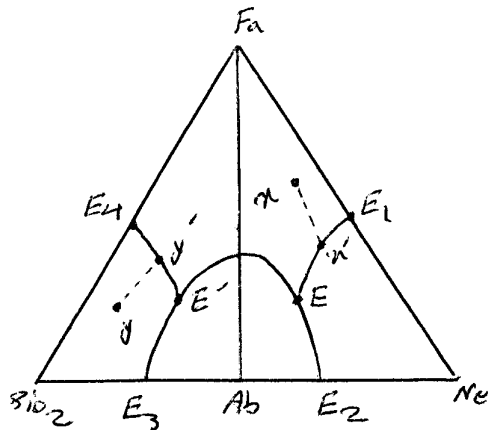
▪ تبلور A (۵۰٪ سازند X، ۱۰٪ Z، ۴۰٪ Y):

- ابتدا محل A را مشخص می‌کنیم، $y - E_1 - E - E_2$ سطح لیکیدوس می‌شود.
- چون A در قلمرو X قرار دارد، خطی به رأس X وصل می‌کنیم و ادامه می‌دهیم تا در A' منحنی حرارتی را قطع کند.
- در مسیر A تا A' ، X متبلور و در A' ، Y نیز شروع به تبلور می‌کند. پس در مسیر $A'E$ ، Y، X متبلور شده تا اینکه در نقطه E همزمان با آن‌ها Z نیز متبلور و تبلور خاتمه می‌یابد.
- نکته: اگر A بر روی E واقع شود هر سه سازند همزمان متبلور می‌شوند.

▪ ذوب D:

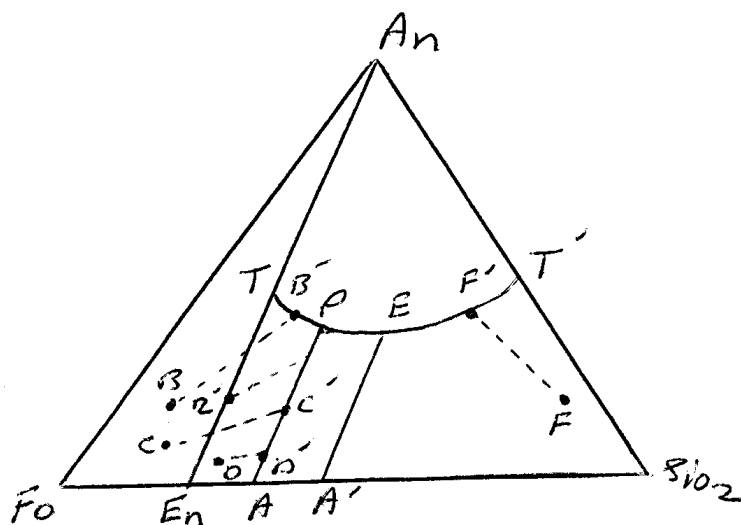
- محدوده‌ای که نمونه مورد نظر در آن قرار دارد آخرین سازنده‌ای است که ذوب می‌گردد.
- شروع ذوب از E است و در آن سازنده‌ای که در قلمرو ترکیب نیست، تماماً ذوب می‌شود
- ذوب D از نقطه E آغاز شده که در آنجا تمام Z و مقداری از X, Y ذوب می‌گردد.
- مابقی عمل ذوب روی منحنی حرارتی ED' که منحنی حرارتی مشترک X, Y است ادامه می‌یابد و در این مسیر فقط Y, X ذوب می‌شود تا در نقطه D' دومین سازند یعنی X کاملاً ذوب شده و فقط Y در مسیر DD' به ذوب خود ادامه می‌دهد تا در D آخرین بلور نیز ذوب شود و کار خاتمه یابد.

◀ دیاگرام‌های سه تایی حد واسط بدون نقطه واکنشی:



- دیواره حد واسط مثلث را به دو مثلث مساوی تقسیم می‌کند.
- هر مثلث دارای نقطه کوکتیک جداگانه‌ای است.
- نحوه ذوب X (نقطه نهایی X):
- شروع ذوب E که هر سه سازند شروع به ذوب می‌کنند و تمام Ab و مقداری از Fa, Ne ذوب می‌شوند و در ادامه ذوب در مسیر Fa, Ne, Ex' به ذوب ادامه می‌دهند تا در x' تمام Ne ذوب می‌شود و در ادامه Fa در مسیر xx' ذوب شده تا در X همه آن ذوب گردد.
- نحوه تبلور y: نقطه نهایی E'
- در y تبلور SiO_2 و Fa نیز متبلور شده و در ادامه در مسیر $SiO_2, Fa, y'E'$ به تبلور خود ادامه می‌دهند تا در نقطه E همزمان با آن‌ها Ab نیز متبلور می‌شود (کوارتز و نفلین را در هیچ ماگمایی با هم نداریم)

◀ دیاگرام‌های سه تایی حد واسط با نقطه واکنشی:



- دیواره مثلث را به دو مثلث نامساوی تقسیم می‌کند.
- در این دیاگرام‌ها نقطه واکنشی P یا R وجود دارد.
- دارای منحنی واکنشی Ap است.
- اگر ترکیب مورد نظر در مثلث $(An-Fo-En)$ باشد و یا بر روی دیواره حد واسط قرار گیرد، نقطه نهایی تبلور و یا شروع ذوب همان نقطه واکنشی R یا P است.
- تبلور B: (نقطه نهایی تبلور P یا R)
- در مسیر BB' فقط Fo متبلور می‌شود تا در B، آنورتیت نیز شروع به تبلور می‌کند در ادامه مسیر $Fo, An, B'P$ متبلور می‌شود تا اینکه در نقطه P (واکنشی) مقداری از بلورهای Fo با مایع SiO_2 واکنش داده و به انستاتیت تبدیل می‌شود و همزمان با آن مابقی Fo و An نیز کاملاً متبلور می‌گردند و ما در P یا R: En, Fo, An را خواهیم داشت.
- تبلور C: (نقطه نهایی تبلور P)
- به دلیل آنکه نقطه C' در روی منحنی واکنشی است عمل تبدیل Fo به En برخلاف ترکیب B در مسیر تبدیل Fo به En صورت می‌گیرد و از Fo کمی به En تبدیل می‌شود تا در نقطه P عمل تبدیل Fo به En خاتمه می‌یابد، پس در P (An, Fo, En) را داریم.
- نکته: در ترکیب B عمل تبدیل Fo به En در یک حرارت ثابت (نقطه P) صورت می‌گیرد در حالی که در ترکیب C در یک مسیر واکنشی با حرارت متغیر $(C'P)$ صورت می‌گیرد.

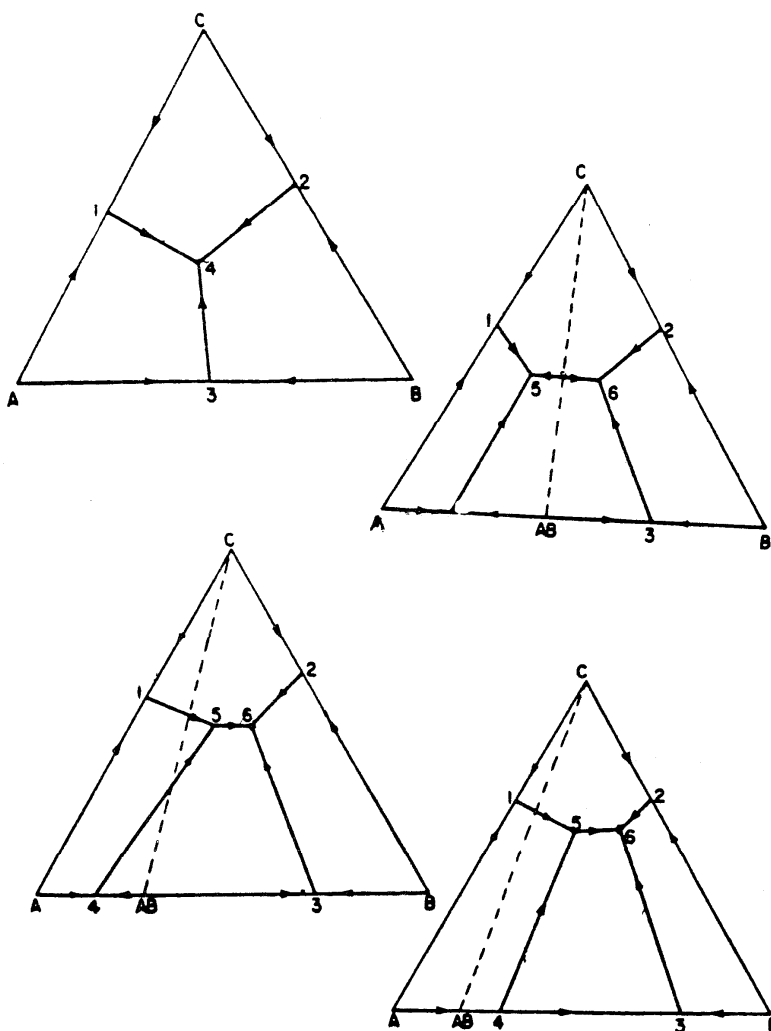


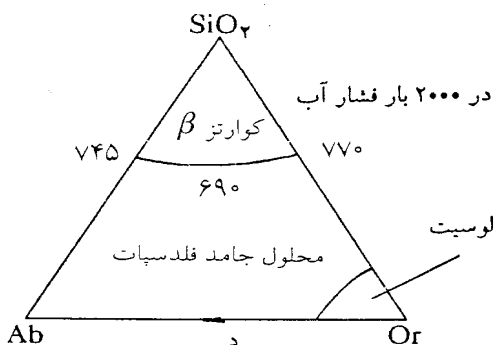
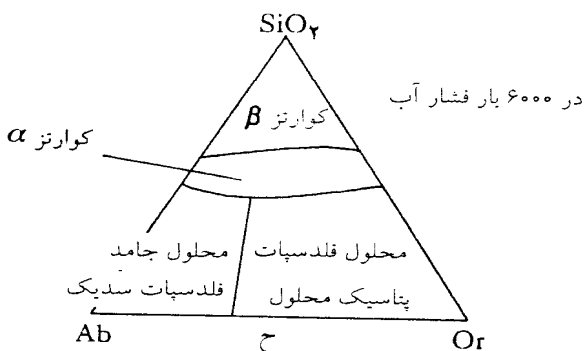
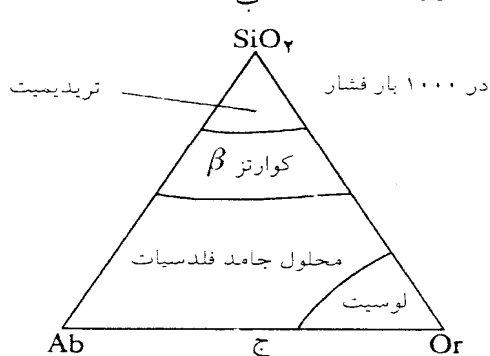
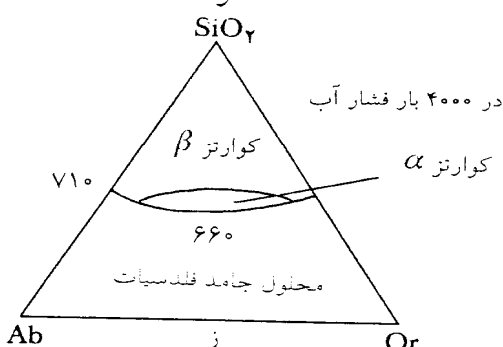
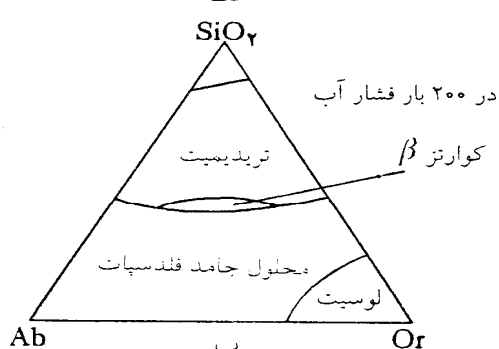
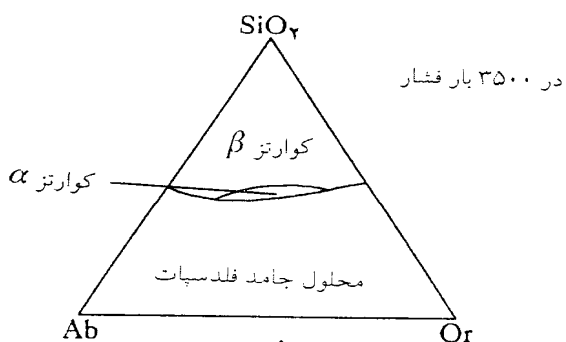
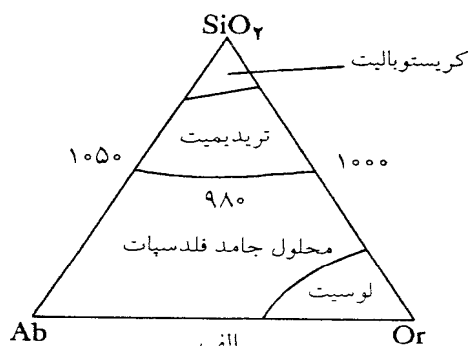
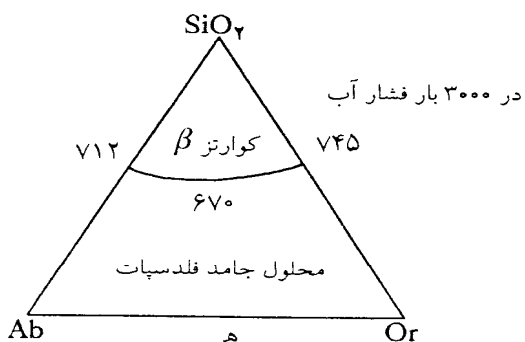
- تبلور D (نقطه نهایی تبلور E)
- عمل تبلور در مسیر $D'P$ صورت می گیرد. برخلاف ترکیب C در مسیر $D'P$ تمام Fo با SiO_2 واکنش می دهد تا به En تبدیل گردد تا در نقطه P عمل واکنش تمام شده و همه Fo به En تبدیل شود، پس در مسیر En, An, PE متبلور شده تا در SiO_2, E نیز با آنها متبلور می شود و در انتها داریم (SiO_2, An, En) .
- تبلور F (نقطه نهایی تبلور E)
- در مسیر FF' فقط SiO_2 متبلور می شود تا در F' همزمان، An متبلور می شود و در ادامه $SiO_2, An, F'E$ به تبلور خود ادامه می دهند تا در En, E نیز متبلور می شود و در انتها SiO_2, An, En داریم.
- تبلور Z (نقطه نهایی P)
- در مسیر ZT فقط An متبلور می شود تا در T همزمان با Fo, An نیز متبلور می شود TP (Fo, An) متبلور تا اینکه در نقطه واکنشی P تمام Fo در واکنش با SiO_2 به En تبدیل می شود و در نهایت En، An در نقطه P متبلور می شود.

نگاهی کلی به قانون فازها:

سیستم یک تشکیل دهنده: $V + P = C + 2 \rightarrow (T, P) \rightarrow (\downarrow V, P \uparrow)$ سیستم دو تشکیل دهنده: $V + P = C + 1 \rightarrow T \rightarrow (\downarrow V, P \uparrow)$ سیستم سه تشکیل دهنده: $V + P = C + 1 \rightarrow T \rightarrow (\downarrow V, P \uparrow)$ نقطه اتکتیک یا یونکتیک E \rightarrow سیستم دو تایینقطه اتکتیک سه تایی یا کوتکتیک E \rightarrow سیستم های سه تایی

< تصاویری از چهار حالت کلاسیک از سیستم سه تایی با نقطه اتکتیک سه تایی:







سیستم‌های ۴ تایی:

- به صورت تترائدرهای ۴ وجهی هستند که از ۴ ترکیب مختلف تشکیل شده اند و در هر رأس یک ترکیب قرار می گیرد.
- فشار ثابت فقط دما متغیر $F = C - P + 1$
- مثال:

سیستم کوارتز، آلپیت، آنورتیت، ارتوز (سیستم گرانیته)

سیستم آلپیت، آنورتیت، دیوپسید، فروسیلیت ($FeSiO_3$) یا سیستم بازالتی

- تأثیر آب در ذوب و تبلور ماگما (فشار بخار آب یا فشار مرطوب):
افزایش فشار بخار آب باعث کاهش دمای ذوب و تبلور کانی‌ها و سنگ‌ها می شود.
افزایش فشار خشک باعث افزایش دمای ذوب و تبلور کانی‌ها و سنگ‌ها می شود. ارتوز:
در فشار خشک تا ۱۹/۵ کیلو بار ذوب ناسازگار صورت می گیرد ولی در حالت فشار مرطوب ذوب ناسازگار به ۲/۵ کیلو بار می رسد.

انستاتیت:

در این مورد عکس حالت قبلی است. در فشار خشک تا ۹ کیلو بار انستاتیت به فورستریت و مایع غنی از سیلیس تبدیل می شود اما در فشار مرطوب تا ۲۰ کیلو بار ذوب و تبلور انستاتیت به صورت ناسازگار است.

- در زون فرورانش آب آزاد شده از سیلیکات‌های آبدار، نقطه ذوب سنگ‌ها را در عمق ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتری کاهش داده و ذوب اتفاق افتاده و مایع غنی از سیلیس تولید می شود. (بازالت تولیتی)

عمل دیگر آب تغییر در پاراژنرها و ایجاد کانی‌های جدید است؛ مثلاً دو ماگما را با ترکیب گرانودیوریتی در نظر می گیریم که یکی در سیستم خشک و دیگری در سیستم آبدار است. گرانودیوریت محیط خشک شامل کوارتز، پلاژیوکلاز و پتاسیم فلدسپار است؛ اما گرانودیوریت در محیط آبدار غیر از موارد فوق دارای هورنبلند و بیوتیت هم هست.

تأثیر آب روی سیستم آلپیت - ارتوز - کوارتز:

افزایش بخار آب باعث، حذف لوسیت - تشکیل پلی مورفهای پایدار کوارتز - محدود شدن تبلور و ذوب لوسیت - افزایش محدوده تبلور کوارتز - کاهش دمای ذوب و تبلور تغییر



ترکیب نقطه مینیمم به سمت آلبیت و در فشار ۵ kb تبلور همزمان دو نوع آلکالی فلدسپار را باعث می شود.

▪ تأثیر آب در افزایش ضریب انفجار:

در ضمن حرکت ماگما به سطح زمین و با کاهش فشار بخار آب و دیگر گازها به طرف بخش های فوقانی حرکت می کند. غلظت ماگما نقش مهمی در آزادسازی گازها دارد. اگر غلظت کم باشد بخار آب و دیگر گازها از شکستگی ها و گسل ها و دیگر ساختارها خارج می شوند و انفجار رخ نمی دهد ولی اگر غلظت زیاد باشد گازها به آسانی ماگما را ترک نکرده و باعث انفجار و ایجاد سنگ های پیرو کلاستیک می شوند. (پیرو کلاستیک = آذرآواری)

همچنین وجود آب در ماگما می تواند باعث ایجاد کانسارهای مهمی از قبیل: مس پورفیری - قلع پورفیری - مولیبدن پورفیری - تنگستن پورفیری و... شود.

بنابراین تأثیر وجود آب در ماگما به طور کلی به شرح زیر است:

- ۱) تبلور سیلیکات های آبدار
- ۲) کاهش دمای شروع تبلور
- ۳) افزایش دامنه تبلور (فرصت سرد شدن و افزایش اندازه بلورها)
- ۴) ایجاد تغییر در پاراژنز
- ۵) تغییر در تبلور عادی یا غیر عادی سیلیکات ها
- ۶) تشکیل زونینگ در پلاژیو کلازها
- ۷) انفجار و ایجاد سنگ های پیرو کلاستیک
- ۸) آلتزه شدن سنگ ها و ایجاد زون های آلتراسیون
- ۹) امکان تشکیل ذخایر ماگمایی... پورفیری

▪ نام گذاری و تعیین سری سنگ های آذرین: (فاکتورهای دسته بندی سنگ های آذرین)

▪ بافت - اندازه دانه ها - رنگ - ترکیب کانی شناسی (مدال) - نحوه تشکیل - منشأ و ترکیب شیمیایی (نورم یا تجزیه شیمیایی سنگ)

▪ بر اساس محیط تشکیل سنگ ها را به درونی، بیرونی و نیمه عمیق تقسیم می کنیم.

درونی (۱ تا ۵ میلی متر و در پگماتیت ها بیشتر از ۵ میلی متر)

نیمه عمیق (۰/۵ تا ۱ میلی متر)



بیرونی (کمتر از ۰/۵ میلی متر)

بر اساس درصد کانی های تیره (ضریب m) مثل پیروکسن - میکا و آمفیبول
اگر m کمتر از ۹۰ درصد باشد برای نام گذاری و طبقه بندی از مثلث F A P Q استفاده
می شود.

اگر m بیشتر از ۹۰ درصد باشد سنگ را مافیک یا اولترامافیک می نامند و برای نام گذاری از
مثلث هایی مثل: cpx - ol - opx استفاده می شود.

▪ نام چند کانی و سنگ مهم:

شارنوکی (چارنوکی) شامل هیپرستن و فلدسپاتهای پرتیتی

فوئیدمونزوسینیت (پلاژیوسینیت)

فوئیدمونزودیوریت و فوئیدمونزوگابرو (اسکسیت)

فوئید دیوریت و فوئید گابرو (نوع نفیلین دار آن را تراکیست گویند و نوع آنالسیم دار آن را
تشنیت گویند)

پیکریت: شامل الیون، پیروکسن همراه با آمفیبول و بیوتیت

کربناتیتها: سنگ های درونی یا بیرونی اند که بیش از ۵۰ درصد کربنات دارند.

فروکربناتیت: یعنی کربناتیت سرشار از آهن

ناترو کربناتیت: کربنات های دارای Na و K

کلسیت کربناتیت:

اگر کلسیت آن دانه درشت باشد «سوویت»

اگر کلسیت آن دانه ریز باشد «آلویکیست»

اگر دولومیت آن بیشتر از ۹۰ درصد باشد «بی فورستریت»



تفسیر دیاگرامها:

۱. محدوده پایداری لوسیت در شرایط خشک و فشار معمولی برقرار است ولی در شرایط آبدار با افزایش فشار از بین می‌رود.
۲. پلی مورفهای کوارتز (Cri, Tri) در شرایط خشک و فشار معمولی (پلی مورفهای حرارت بالا) پایدار ولی در شرایط آبدار از بین می‌روند و پلی مورفهای حرارت پایین (α, β) جانشین آنها می‌شوند.
۳. پایداری سانیدین تا حداکثر ۴۰۰۰ بار فشار است و در بیشتر از این مقدار فلدسپات به صورت ارتوکلاز یا میکروکلین در سنگ ظاهر می‌شود.
۴. کانی‌های لوسیت و سانیدین (F) در آذرین خروجی به علت فشار بخار آب کم پایدار است.
۵. در شرایط فشار بالا، شرایط تشکیل پرتیت و آنتی پرتیت در یک سنگ آذرین درونی فراهم می‌شود، یعنی:

پرتیت معادل \leftarrow سانیدین حرارت پایین

آنتی پرتیت معادل \leftarrow آنورتوز حرارت پایین

نکات:

- سیستم گرانی: کوارتز - ارتوز - آلپیت - آنورتیت
- سیستم بازالتی یا گابرویی: آلپیت - آنورتیت - دیوپسید - فروسیلیت
- ترکیب گوشته فوقانی: $Cpx + Opx + Oliv$ + یک کانی آلومینیوم دار
- سیستم ترکیب سنگ‌های پوسته قاره‌ای: سیلیس - آلپیت - ارتوکلاز (سیستم باقیمانده)
- سیستم آلپیت - آنورتیت - دیوپسید: فاقد اتکتیک ۳ تایی و دارای ۲ قلمرو تبلور است
- سیستم‌های چهار تشکیل دهنده: (دارای ۶ سیستم دوتایی و ۴ سیستم سه تایی)
- استفاده از قانون فازها در دگرگونی: $P = C + 2 - (R+V)$
- $R =$ تعداد واکنش مستقل بین فازها
- در ذوب دیوپسید Cpx به ازای هر ۱ کیلو بار فشار، حرارت ذوب $10^0 C$ اضافه می‌شود.
- نیف یا نیفه هسته زمین است که دارای $Fe+Ni$ است.
- ترکیب شیمیایی گرانیته‌ها شبیه رسوبات پلیتی است.
- تمام گرانیته‌های پالین ژنتیک از ذوب بخشی رسوبات پلیتی اند.
- اثر فیلتر پوس: با ته‌نشین شدن بلورهای، قسمت تحتانی پر شده و ماگما به سمت بخش فوقانی حرکت می‌کند
- توجه داشته باشید که هضم اصولاً پدیده‌ای شیمیایی و نه کاملاً حرارتی است.
- مایعات گرانیته قادر به ذوب سنگ‌های بازالتی و دیوریتی به علت حرارت ذوب بالاتر نیستند.



- عدم کاربرد سری باون شامل: (۱) در فشار بالا Opx قبل از Oliv؛ (۲) سری آگپائیتی؛ (۳) مشاهده فیالیت Fa با کوارتز Qtz.
- پیروژنیک: مواد فرارشان کم است
- هید اتوژنیک: شامل مواد فرار است
- الیوین در طبیعت به صورت محلول جامد فورستریت - فیالیت است.
- پلاژیوکلاز در طبیعت به صورت محلول جامد آلپیت - آنورتیت است.
- F(k): حرارت بالا تبدیل به \leftarrow LUC
- F(k): در فشار آب تبدیل به \leftarrow F(k)
- منحنی های تبلور جزء به جزء: بلورهای جامد پس از تشکیل به خوبی از سیستم خارج می شود.
- تعادلی: مایع با بلور در تعادل اند و پیوسته با هم واکنش دارند.
- استثناء: سیستم پسدوولاستونیت - آکرمائیت - ژلنیت، نه تبلور جزئی و نه تبلور تعادلی دارد، بلکه حد واسط است.
- می توان منحنی های تعادل را به طور مستقیم از منحنی های جزء به جزء ترسیم کرد.
- ذوب جزء به جزء کامل بر عکس تبلور جزء به جزء کامل نیست.
- از تبلور جزء به جزء مایعاتی به وجود می آید که ترکیب آن ها نسبت به تبلور بخشی، تبلور متعادل و ذوب متعادل محدودتر است.
- سیستم سه تایی با ذوب جور: ۲ سیستم سه تایی + ۵ سیستم دو تایی.
- وجود اسپینل در هر سیستم نشانه کاذب بودن آن است.

◀ توجه:

(۱) سیستم گرانیتی

(۲) سیستم بازالتی - گابرویی: $An \leftrightarrow Ab + Di(Px)$ + فروسیلیت

Or
Si + An (۳) سیستم باقیمانده:

(۴) سیستم فاقد E سه تایی: $An \leftrightarrow Ab + Di(Cpx)$

مقیاس حرارتی فون کوبل (بر اساس افزایش دمای ذوب):

استی بین \leftarrow کالکوپیریت \leftarrow گرونا \leftarrow آکتینوت \leftarrow ارتوز \leftarrow پیروکسن \leftarrow کوارتز

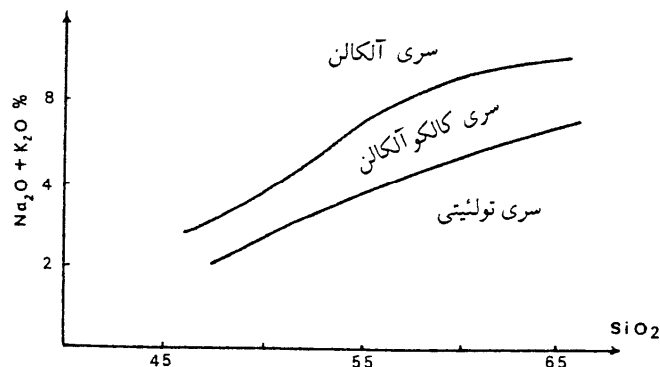
در سیستم کندانه $V < 3$ است، چنانچه $V = 2 \leftarrow C = P$

مایع حاصل از ذوب پریدوتیت:



فشار بالا: آلکالن، فشار متوسط: کالک آلکالن، فشار پایین: تولیتی

$$\frac{Alc}{SiO_2} \text{ یا نمودار } \frac{Na_2O + K_2O}{SiO_2}$$



- آلیت، ارتوز و الیون (به علت Si بالا) را در ACF نمی توان نمایش داد
- (بیگانه سنگ: زینولیت)، (بیگانه کانی یا بلور: زینو کریست)
- اثبات هضم با $\frac{Sr^{87}}{Sr^{86}}$ و گوگرد و اکسیژن
- پدیده ترامپ: مشاهده اسکلت کانی های سنگ و یا سوزن های بعضی از کانی ها در حاشیه آنکلاو.
- Px و Plg مهم ترین کانی های حساس به تغییرات شیمیایی می باشند.
- کانی های تیپومورف: کانی های که کاملاً فرآیند تشکیل خود را مشخص می نمایند (مثلاً پولوسیت تن ها در پگماتیت و در آخرین مراحل رشد می کند).

◀ مراحل تبلور ماگما:

- ✓ مرحله ارتو ماگمایی ← پیروژنتیک (تشکیل همه کانی های سیلیکاته)
- ✓ مرحله پگماتیتی
- ✓ مرحله پنوماتولیتی ← کانی سازی
- ✓ مرحله هیدروترمالی ← کانی سازی

◀ توجه:

- آلیت تجزیه (ذوب) ← نفلین + کوآرتز
- پتاسیم فلدسپات شرایط خشک ← LUC + F(k) (ذوب ناچور)
- پتاسیم فلدسپات شرایط مرطوب ← F (k) (ذوب جور)
- انستاتیت خشک ← انستاتیت + FO (ذوب ناچور)
- انستاتیت فشار بخار ← انستاتیت (ذوب جور)



- ارتوکلاز (ذوب) ← $\text{SiO}_2 + \text{Luc}$
- آندالوزیت (ذوب) ← مولیت + SiO_2
- نفلین + کوارتز ← ژادئیت (فشار بالا Px)
- نفلین + آلپیت ← ژادئیت (فشار بالا Px)

◀ دیگرام‌های دوتایی:

- ✓ حد واسط بدون نقطه واکنشی: ذوب جور
- ✓ حد واسط با نقطه واکنشی P یا R: ذوب ناجور
- ✓ سنگ‌های طبیعی دامنه ذوب دارند، نه نقطه ذوب چون نقطه ذوب سنگ از کانی‌ها خیلی کمتر است
- ✓ میدان پایداری کانی‌های دارای وزن مخصوص کم با افزایش فشار کاهش می‌یابد و از بین می‌رود (کلاً حلالیت آب با دما رابطه عکس دارد).
- ✓ ذوب تعادلی بر عکس تبلور تعادلی است، اما ذوب بخشی بر عکس تبلور بخشی نیست.

◀ توجه:

- ✓ بر اساس کاهش فشار:
- اکلوژیت < گرانولیت گارنت دار < بازالت
- گارنت لریولیت < اسپینل لریولیت < پلاژیوکلارلریولیت
- پریدوتیت گارنت دار < اسپینل دار < پلاژیوکلاردار

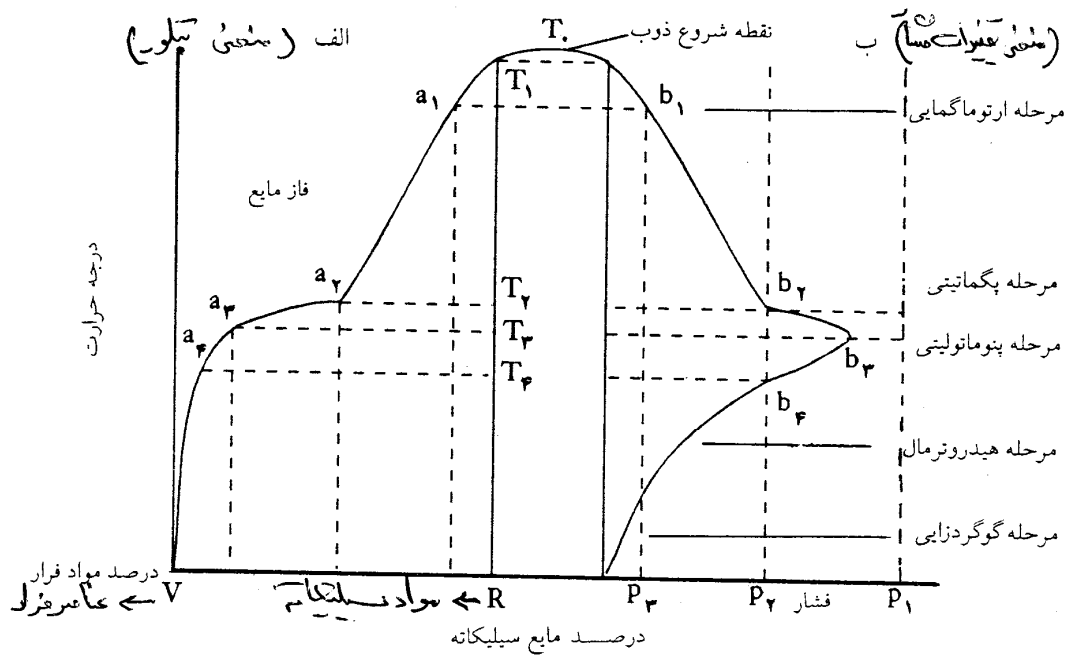
◀ نکته:

- ✓ عامل اصلی تنوع بازالت‌ها، فشار است.
- ✓ نکته: تغییرات عناصر سازگار مانند، Ni, Mg, Fe تن‌ها معیار برای اندازه‌گیری تفریق یا نرخ ذوب بخشی به حساب می‌آیند.

◀ توجه:

- ✓ آبساروکیت: بازالت شوشونیتی
- ✓ لاتیت: داسیت شوشونیتی
- ✓ باناکیت: آندزیت شوشونیتی

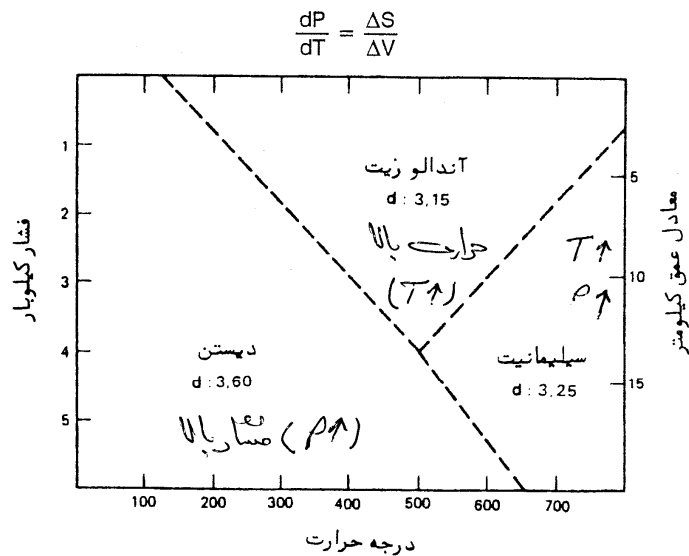
❁ مراحل مختلف تبلور یک مایع مذاب سیلیکاته:



❁ مراحل تکامل ماگما با توجه به دیاگرام:

- ۱- مرحله ارتوماگمایی: که در این مرحله سنگ‌های سیلیکاته تشکیل می‌شوند.
- ۲- مرحله پگماتیستی: که کانی‌هایی از مایع باقیمانده سیلیکاته در حضور مواد فرار متبلور می‌شوند.
- ۳- مرحله پنوماتولیت: که در آن عناصر فرار نقش مهمی به عهده دارند و بیش از ۵۰٪ ماده باقیمانده را تشکیل می‌دهند.
- ۴- مرحله هیدروترمال: که در آن محلول‌های آبی وجود دارد و تن‌ها موادی که قابلیت انحلال زیاد داشته باشند در آن به حالت محلول یافت می‌شوند.

❁ قلمرو پایداری کانی‌های $(Al_2Si_2O_5)$:



❖ تفریق در پلاژیو کلازها:

بلورهای متبلور شده در آشیانه ماگمایی به صورت شناور باقی نمی ماند و رسوب می کنند در نتیجه ارتباط آن با ماگما قطع می شود.

ماگمایی با حجم نسبتاً زیاد حاوی ۸۰ درصد آنورتیت و ۲۰ درصد آلپیت را در نظر می گیریم. در حالتی که سیستم آهسته سرد شود پلاژیو کلازهایی که متبلور می شوند لحظه به لحظه با مایعی که در آن شناورند واکنش می دهند در دمای T_a اندازه و وزن پلاژیو کلازها به حدی است که دیگر به صورت شناور باقی نمی ماند پس در اتاقک ماگمایی رسوب کرده و تماس آن با ماگما قطع می شود. پس در دمای T_a مایع جدید L_a شروع به تبلور خواهد کرد.

(فرض بر این است که در دمای T_b مجدداً پلاژیو کلازها رسوب می کنند)

پس مایع باقی مانده بانام L_b شروع به تبلور خواهد کرد. تکرار این عمل باعث تفریق در پلاژیو کلازها شده و از یک ماگمای اولترامافیک پلاژیو کلازهایی با ترکیب مختلف تولید می شود. (کمپلکس بوشولد در آفریقای جنوبی و استیل واتر آمریکا) با تفریق پلاژیو کلاز دمای مایع و ترکیب نهایی عوض می شود.

❖ زونینگ (منطقه بندی) در پلاژیو کلازها:

عوامل مؤثر در ایجاد زونینگ:

- (۱) کاهش سریع و لحظه ای دمای ماگما
 - (۲) افت فشار بخار آب (فشار خشک با دمای ذوب و تبلور نسبت مستقیم دارد ولی فشار مرطوب رابطه عکس دارد. در واقع کاهش فشار بخار آب باعث افزایش دما و تغییر ماگما می شود)
 - (۳) اختلاط با ماگمای جدید
 - (۴) تغییر در غلظت ماگما (تغییر مقدار SiO_2 باعث تغییر در ترکیب ما می شود)
 - (۵) وجود قطعاتی از سنگ دیواره در ماگما
- ✓ در پلاژیو کلازها تغییر مقدار آلپیت و آنورتیت از مرکز به سمت حاشیه و یا از داخل به خارج باعث ایجاد این فرم می شود.



✓ اگر از مرکز به سمت حاشیه مقدار آلیت افزایش یابد زونینگ نرمال و برعکس آن زونینگ معکوس است.

❖ بررسی نمودار زونینگ:

در فشار ۰/۵ کیلو بار و شرایط نیمه عمیق ماگما در حال سرد شدن است. پس از مذاب X در دمای T1 پلاژیوکلاز P1 تشکیل و در دمای T2 پلاژیوکلاز P2 تشکیل می شود. حال اگر در دمای T2 انفجار رخ دهد فشار بخار آب کاهش می یابد پس دمای منحنی افزایش پیدا می کند. در فشار ۰/۱ کیلو بار P3 روی P2 تشکیل می شود و ایجاد زونینگ می کند. در یک منطقه آتش فشانی اگر مطمئن باشیم که زونینگ بر اثر فوران ایجاد شده می توانیم مراحل انفجار را هم محاسبه کنیم. در صورتی که مجدداً فشار بخار آب کمی افزایش یابد و دمای سیستم کاهش یابد قسمتی از پلاژیوکلاز قبلی ذوب شده و پلاژیوکلاز جدید روی آن تشکیل می شود. در صورتی که تغییرات در چند مرحله انجام شود، می توان زونینگ مراحل انفجار را بررسی و تعداد آن را تعیین کرد.



❖ پالتو مغناطیس:

از مغناطیس دیرین که از گذشته تا امروز در سنگ‌ها حفظ شده می‌توان به جهت میدان مغناطیس در گذشته پی ببریم. کانی‌هایی که خاصیت مغناطیسی دارند در ماگما در راستای میدان مغناطیس زمین قرار می‌گیرند.

کانی‌ها را بر اساس خاصیت مغناطیسی به ۵ دسته تقسیم می‌کنند:

- (۱) دیا مغناطیس
- (۲) پارا مغناطیس
- (۳) فرو مغناطیس
- (۴) فری مغناطیس
- (۵) آنتی فرو مغناطیس

چرخش الکترون با بار - به دور هسته با بار + ایجاد میدان مغناطیس می‌کند که به آن چرخش اوربیتالی می‌گویند. به دلیل حرکت الکترون‌ها در مدارها در جهات مختلف مقدار مغناطیس تولید شده بسیار ناچیز است. در حالت عادی این اجسام خاصیت مغناطیس ندارند. اجسامی که خاصیت مغناطیس ندارند فقط وقتی در یک میدان قرار گیرند این خاصیت در آن‌ها ظاهر می‌شود که به آن‌ها دیا مغناطیس می‌گویند.

دیا مغناطیس:

خاصیت مغناطیس ضعیف دارند چون جهت مغناطیس تولید شده در جسم مخالف با جهت میدان دیا مغناطیس است. مثل نمک، کوارتز، مس...

پارا مغناطیس:

در این اجسام الکترون‌ها غیر از چرخش به دور هسته به دور خودشان هم می‌چرخند و در نتیجه میدان مغناطیس تولید شده افزایش می‌یابد.

این نوع مغناطیس در اجسام به خودی خود وجود ندارد و هنگامی که جسم در میدان مغناطیس قرار گیرد ظاهر می‌شود. فرق این نوع مغناطیس با دیا مغناطیس در این است که مغناطیس تولید شده با میدان هم‌جهت است. به این میدان‌های مغناطیسی اسپین می‌گویند.

مثل پیروکسن، بیوتیت، گارنت، روتیل و ایلمنیت...

اسپین: به حرکت الکترون به دور خودش حرکت اسپین می‌گویند.

به موادی که در حالت عادی خاصیت مغناطیسی دارند فرو مغناطیس گویند. این خاصیت مربوط به آرایش در خانه الکترونی است. بر این اساس مواد به ۳ گروه فرو مغناطیس، فری مغناطیس و آنتی فری مغناطیس تقسیم می‌شوند.

فرو مغناطیس:



اسپین ها هم اندازه و هم جهت هستند و میدان های تولید شده نیز هم اندازه و هم جهت هستند.

فری مغناطیس: غیر هم اندازه و غیر هم جهت

آنتی فرو مغناطیس: هم اندازه و غیر هم جهت

- پس اجسامی که خاصیت مغناطیسی دائم دارند، اگر در یک میدان مغناطیسی قرار گیرند خاصیت مغناطیس آنها افزایش می یابد. با افزایش شدت میدان تا یک حد خاص خاصیت مغناطیسی اضافه می شود و از آن به بعد افزایش شدت میدان تأثیری بر مغناطیس جسم ندارد. در این حالت جسم اشباع شده است که به آن اشباع مغناطیسی گویند.
- برای حذف خاصیت مغناطیس باقی مانده باید یک نیروی مغناطیسی در خلاف جهت استفاده شود که به آن نیروی کورسیو گفته می شود. نیروی کورسیو به شکل اندازه، ترکیب شیمیایی و دما بستگی دارد مثلاً برای یک کانی سوزنی شکل نیروی کورسیو بیشتری نیاز داریم تا یک کانی مکعبی.
- هر قدر ذرات کوچک تر باشند نیروی کورسیو بیشتری نیاز داریم که مغناطیس آنها خنثی شود.

کانی های مهم مغناطیسی:

◀ **مگنتیت** (Fe_3O_4): خاصیت فری مغناطیس دارد. در هر واحد از شبکه مگنتیت ۲۴ اتم آهن وجود دارد. از این ۲۴ اتم، ۸ عدد را در گروه A که اسپین آنها با هم هم جهت است می گذاریم و ۱۶ عدد دیگر را در گروه B که اسپینهای آنها به موازات هم است قرار می دهیم. ۸ اتم گروه A با ۸ اتم از گروه B خنثی می شوند و ۸ اتم باقی مانده در مگنتیت. ایجاد خاصیت مغناطیس می کنند. دما کوری مگنتیت $580^{\circ}C$ است.

◀ **اواواسپینل** (Fe_2TiO_4): خاصیت آنتی فرو مغناطیس دارد و در سنگ های آتش فشانی که مگنتیت آنها غنی از تیتانیوم باشد دیده می شود. دمای کوری آن پایین است: $153^{\circ}C$ -

◀ **هماتیت** (Fe_2O_3): خاصیت آنتی فرو مغناطیس دارد. خاصیت مغناطیس آن ضعیف ولی دائمی و پایدار است. دمای کوری آن $680^{\circ}C$ است.

◀ **ایلمنیت** ($FeTiO_3$): در دمای عادی خاصیت مغناطیس ندارد ولی در $216^{\circ}C$ - آنتی فرو مغناطیس است. پس دمای کوری آن دمای محیط است. در سنگ های آتش فشانی غنی از تیتانیوم دیده می شود.

◀ **مگهمیت** (Fe_2O_3): یک نوع مگنتیت اکسید شده است که تعداد اتم های آهن در شبکه پایین است. در دمای $300^{\circ}C$ به هماتیت تبدیل می شود. دمای کوری آن متغیر است. در گدازه های آتش فشانی در دمای $545^{\circ}C$ تا $675^{\circ}C$ تولید می شود. در محیط های رسوبی در دمای پایین و محیط مرطوب، مگنتیت به مگهمیت تبدیل می شود. در ساخت نوارهای مغناطیس (صوتی تصویری) از این کانی استفاده می شود.



◀ **پروتیت (FeS):** تنها سولفیدی است که خاصیت مغناطیسی دارد. مغناطیس آن از نوع فری مغناطیس است. دمای کوری آن 320°C است.

❖ بر اساس مغناطیس باقی مانده در سنگها ۳ نوع پالئو مغناطیس وجود دارد:

TRM (مغناطیس باقی مانده حرارتی Termal Remant Meghntic):

در سنگهای آذرین کانی‌هایی که خاصیت مغناطیس دارند در هنگام سرد شدن در جهت میدان مغناطیس زمان قرار می‌گیرند؛ بنابراین بعد از سرد شدن و تبلور جهت میدان مغناطیس زمان در آنها ثبت شده است.

DRM (مغناطیس باقی مانده ته‌نشینی Deposition Rement Meghntic):

در سنگهای رسوبی کانی‌هایی که خاصیت مغناطیسی دارند و به صورت آواری حمل می‌شوند در محیط در جهت میدان مغناطیسی ته‌نشین و سخت می‌شوند.

CRM (مغناطیس باقی مانده شیمیایی Chemical Rement Meghntic):

شامل کانی‌هایی می‌شود که در زمان اکسیداسیون و دیگر فرایندهای شیمیایی مغناطیس را در خود حفظ کرده‌اند.

✓ عواملی که در خاصیت مغناطیس سنگ اثر می‌گذارند:

(۱) شکل ذرات: ذراتی با ابعاد و اندازه‌های یکسان مغناطیس پایداری ندارند اما بلورهای کشیده و پایداری بیشتری دارند.

(۲) اندازه ذرات: نیروی کورسیو با اندازه ذرات نسبت عکس دارد. پایداری مغناطیسی با کاهش اندازه ذرات بالا می‌رود.

(۳) مقدار اکسید تیتانیوم (TiO_2): افزایش این اکسید باعث افزایش ابعاد شبکه‌ها می‌شود. در نتیجه پایداری کم می‌شود و نیروی کورسیو هم کم می‌شود.

(۴) جدائی در فاز جامد: باعث کاهش ابعاد بلورهای مغناطیسی می‌شود. پایداری افزایش می‌یابد و نیروی کورسیو هم زیاد می‌شود.



✿ نام گذاری و تعیین سری سنگ‌های آذرین:

اصطلاحات:

- **هیالوکلاست:** قطعات شیشه آبدار برشی (زاویه‌دار) که در هنگام ورود ماگما به محیط مرطوب و یا دریا ایجاد شده است.
- **اپی کلاست:** قطعات سنگ‌های آتش‌فشانی که در اثر هوازدگی و فرسایش حمل شده و رسوب گذاری بر روی آن‌ها انجام شده است.
- **فیام:** اشکال شعله مانند در قطعات پومیس که در پیروکلاستیک‌های جوش خورده دیده می‌شود.
- **لاهار:** در اثر ذوب برف و یخ همزمان یا قبل از فعالیت آتش‌فشان تشکیل می‌شوند.
- **پپریت:** سنگ‌های رسوبی دانه‌ریز که در آن قطعات بزرگ آتش‌فشانی دیده می‌شود.
- **پرلیت:** شیشه‌های طبیعی آبدار که در محیط مرطوب تشکیل می‌شوند.
- **پومیس (پامیس):** قطعات شیشه‌ای یا متبلور که قسمت اعظم آن فضاهای خالی است. وزن مخصوص آن‌ها کم بوده و از گدازه‌های اسیدی تا حد واسط و غنی از گاز تولید می‌شوند.
- **پالاگونیت:** شیشه آبدار با ترکیب بازالتی که در محیط دریایی تشکیل می‌شود. مثل زون گسترش اقیانوسی که آب در مجاورت ماگما است.
- **پیزولیت:** شکل‌های کروی و تخم‌مرغی با لایه‌بندی که از خاکسترهای آتش‌فشانی تشکیل شده است. وقتی اتمسفر غنی از خاکستر باشد و باران بیارد و محیط برای رسوب گذاری آن‌ها فراهم باشد این اشکال به وجود می‌آیند.
- **توفیت:** مجموعه‌ای از قطعات پیروکلاستیک (خاکستر آتش‌فشانی) به همراه قطعات رسوبی که در محیط دریایی ته‌نشین می‌شوند.

✿ فاکتورهای تعیین سری سنگ‌های آذرین:

(۱) منشأ

(۲) ترکیب کانی‌شناسی

(۳) موقعیت تکتونیکی

(۴) ترکیب شیمیایی



از نظر منشأ و موقعیت تکتونیکی سنگ‌های آذرین به ۳ سری تقسیم می‌شوند:

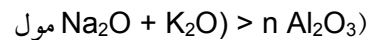
(۱) سری فوق آلكالین

(۲) سری آلكالین

(۳) سری ساب آلكالین

از نظر کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی ابتدا باید سنگ‌های فوق آلكالین را جدا کنیم.

برای سنگ‌های فوق آلكالین:



- ✓ امروزه دیگر از واژه غریب و نامأنوس ساب آلكالین استفاده نمی‌شود و آن را به دو سری کالک‌آلكالین و تولیتی تقسیم می‌کنند.
- ✓ سری آلكالین را بر اساس درصدهای اکسید سدیم و پتاسیم به دو گروه سدیک و پتاسیک تقسیم می‌کنند.
- ✓ در سری تولیتی سنگ‌ها از آهن غنی‌اند. مثل بازالت تولیتی، آندزیت تولیتی، انواع داسیت، دیوریت، ریولیت، گرانیت‌های آهن‌دار و برخی گابروها.
- ✓ در سری کالک‌آلكالین آهن کم و مقدار آلومینیم از سری‌های دیگر بیشتر است. مثل بازالت کالک‌آلكالین، آندزیت، داسیت، ریولیت، گابرو، منزودیوریت، تونالیت گرانودیوریت و گرانیت

ماگماتیسم و تکتونیک صفحه‌ای:

از دیدگاه تکتونیک صفحه‌ای بر اساس حرکت نسبی صفحات قاره‌ای و اقیانوسی مناطق زیر را می‌توانیم داشته باشیم:

(۱) حاشیه‌های مخرب (مرز همگرا)

(۲) حاشیه‌های سازنده (مرز واگرا)

(۳) نقاط داغ (hot spot)

در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود:

(۱) حاشیه‌های مخرب (مرز همگرا):

زون فرورانش حاشیه قاره‌ها Continental Margine Subduction Zone

زون فرورانش جزایر قوسی Iland Arcs Subduction Zone

زون تصادم قاره‌ها Continental Collision Zone

(۲) حاشیه‌های سازنده (مرز واگرا)

زون گسترش میان‌اقیانوسی Oceanic Spreading Zone

ریف‌های درون قاره‌ای Continental Rifting Zone

ریف‌های پشت جزایر قوسی Back Arc Rifting



نقاط داغ (hot spot):

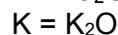
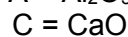
داخل صفحات قاره‌ای Continental Hot Spot

داخل صفحات اقیانوسی Oceanic Hot Spot

- در زون فرورانش حاشیه قاره‌ها و جزایر قوسی سری تولییتی کالک آلکالن، آلکالن و مجموعه‌ای افیولیتی را داریم
- در زون تصادم قاره‌ها ماگمای اسیدی نوع S (منشأ رسوبی) را داریم.
- در زون گسترش کف اقیانوسی بازالت‌های نوع نرمال (N – MORB) و بازالت‌های نوع (P – MORB) را داریم.
- ریفت‌های درون قاره‌ای شامل سری بازالت آلکالن، ماگمای اسیدی نوع S و I کربونیت‌ها و کیمبرلیت‌ها می‌شود.
- ریفت‌های پشت جزایر قاره‌ای هم مثل ریفت‌های درون قاره‌ای هستند ولی با تنوع سنگی کمتر
- نقاط داغ در پوسته اقیانوسی شامل بازالت تولییتی و بازالت آلکالن می‌شود.
- نقاط داغ درون قاره‌ای شبیه به ریفت‌های درون قاره‌ای هستند.

ژئو سنگ‌های آذرین:

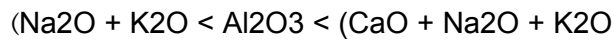
- **گرانیت‌ها:** فراوان‌ترین سنگ‌های آذرین در روی پوسته هستند که به صورت باتولیت و در مقیاس کوچکتر به صورت استوک یافت می‌شوند. به‌طور کلی گرانیتوئید یعنی سنگ آذرین درونی با کوارتز بیشتر از ۲۰٪
- گرانیتوئیدها شامل آلکالی گرانیت، گرانیت معمولی، گرانودیوریت، تونالیت، کوارتز دیوریت و کوارتز مونزونیت است.
- اما گرانیت‌های واقعی از انواع سینوگرانیت و مونزوگرانیت هستند.
- گرانیت‌ها بر اساس معیارهای مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند که مهم‌ترین آن‌ها اندیس شاندا (A/CNK) است.



- بر اساس اندیس شاندا گرانیت‌ها را به ۴ گروه تقسیم‌بندی می‌کنند:
- (۱) فوق آلومینیم (per aluminous granite): در این نوع از گرانیت‌ها نسبت A/CNK بزرگتر از یک است و مقدار کربندم در نورم سنگ از صفر بیشتر است.

- (۲) ساب آلومینیم (sub aluminous granite): در این نوع گرانیت‌ها نسبت A/CNK برابر با یک است و مقدار کربندم در نورم سنگ برابر با صفر است.

- (۳) متا آلومینیم (meta aluminous granite): در این نوع گرانیت‌ها نسبت A/CNK کوچکتر از یک است و مقدار کربندم در نورم سنگ برابر با صفر است.



۴) فوق آلكالن (per alkaline granite): در این نوع گرانیت‌ها نسبت $Na_2O + K_2O > Al_2O_3$ است و مقدار کربن در نورم سنگ برابر با صفر است.

- چاپل و وایت گرانیت‌ها را به دو گروه S و I تقسیم کردند: (S که منشأ گرانیت‌ها ذوب پوسته قاره‌ای است. I که منشأ گرانیت‌ها تفریق ماگمایی است.

▪ بر اساس محیط تکتونیکی هم می‌توان گرانیت‌ها را به ۴ دسته تقسیم‌بندی کرد:

S (۱)

I (۲)

A (۳)

M (۴)

S): در زون تصادم قاره‌ها و با منشأ ذوب بخشی سنگ‌های پوسته قاره‌ای است. ضریب شاند در این نوع از نوع فوق آلومینیم بوده و از نظر ترکیب در محدوده گرانیت هستند. (گرانیت نوع کوهزایی)

I): در زون فرورانش حاشیه قاره‌ها و جزایر قوسی دیده می‌شوند و حاصل تفریق ماگمای کالکوآلكالن یا بازالت‌های جزایر قوسی می‌باشند. از نظر ضریب شاند این نوع گرانیت‌ها از انواع متا آلومینیم هستند. دامنه تغییر ترکیب آن‌ها در محدوده کوارتز مونزونیت، گرانودیوریت و گرانیت است.

A): به آن‌ها گرانیت‌های غیر کوهزایی هم گفته می‌شود. در داخل پوسته قاره‌ای یا ریف‌های درون قاره‌ای تشکیل می‌شوند و حاصل ذوب بخشی سنگ‌های پوسته قاره‌ای می‌باشند. ماگمای این نوع گرانیت‌ها از نوع بدون آب است. از نظر ضریب شاند از نوع فوق آلكالن هستند.

M): به آن‌ها پلاژیوگرانیت هم گفته می‌شود و همراه با مجموعه‌های افیولیتی دیده می‌شوند. از نظر ضریب شاند از نوع متا آلومینیم است. دامنه ترکیب آن‌ها در محدوده کوارتز دیوریت و تونالیت است.

- پیرس و همکاران گرانیت‌ها را بر اساس عناصر کمیاب مانند روییدیم (Rb)، ایتیریم (Yb)، تانتانیم (Ta)، نیویم (Nb) و ... تقسیم‌بندی کردند:



- (۱) گرانیت‌های زون گسترش (ORG)
- (۲) گرانیت‌های همزمان با تصادم قاره‌ای کوهزایی (Syn – Cologen Granite)
- (۳) گرانیت‌های درون صفحه‌ای (Within Plate Granite)
- (۴) گرانیت‌های کمربندهای ماگمایی زون فرورانش (Volcanic Arc Granite)

✿ ایزوتوپ‌ها و کاربرد آنها در حل مسائل زمین‌شناسی:

- ایزوتوپ‌ها بر دو نوع‌اند:
 - الف) پایدار
 - ب) ناپایدار
- ایزوتوپ‌های ناپایدار برای سن سنجی مهم می‌باشند.
- ایزوتوپ‌های مهم ناپایدار:

واکنش	نیمه‌عمر
آرگون 40 → پتاسیم 40	1.25×10^{10}
استرانسیم 87 → روبیدیم 87	4.88×10^{10}
نوییدیم 143 → ساماریم 147	1.66×10^{10}
سرب 237 → اورانیم 235	7.04×10^{10}
سرب 206 → اورانیم 238	4.48×10^{10}

✿ سن سنگ‌های آذرین را به دو روش تعیین می‌کنند:

الف) **نسبی:** با مقایسه سنگ‌ها با یکدیگر و با استفاده از پدیده‌های زمین‌شناسی مثلاً توده‌های نفوذی جوان‌ترند و یا یک گسل که جوان‌تر از لایه‌هایی است که آن‌ها را تحت تأثیر قرار داده و یا در لایه‌بندی لایه‌های بالایی جوان‌ترند.

ب) **مطلق:** که با استفاده از ایزوتوپ‌های ناپایدار است و بسیار دقیق‌تر است؛ مثلاً:

✓ روش پتاسیم - آرگون:

- این روش در سنگ‌هایی که دارای پتاسیم بوده و قابلیت نگه‌داری گاز آرگون را هم دارند استفاده می‌شود. پتاسیم مربوط به گروه اول جدول تناوبی است و از نظر فراوانی در پوسته هشتمین عنصر است و دارای ۳ ایزوتوپ 39 و 40 و 41 است. در این میان پتاسیم 39 از همه بیشتر و پتاسیم 40 از همه کمتر است.



- آرگون به صورت گاز است و دارای ۳ ایزوتوپ 36 و 38 و 40 است که در این میان آرگون 40 از همه بیشتر و آرگون 38 از همه کمتر است.
- هر اندازه پتاسیم سنگ یا کانی بیشتر باشد از آن برای سن های جوان استفاده می شود. مثل کانی سانیدین و لوسیت و هرچه پتاسیم کمتر باشد برای سن های قدیمی استفاده می شود مثل کانی پیروکسن.

* کانی های مناسب برای تعیین سن به روش پتاسیم - آرگون:

- پتاسیم فلدسپار: این کانی به شکل ارتوز و میکروکلین برای تعیین سن به این روش مناسب نیستند زیرا در دمای معمولی نمی توانند آرگون را در خود نگه دارند؛ اما سانیدین برای این کار مناسب است که برای سن سنجی سنگ های جوان و آتش فشانی یا بیرونی استفاده می شود.
- پلاژیوکلاز: پلاژیوکلازهای حرارت بالا که در سنگ های آتش فشانی دیده می شوند مثل آل بیت دما بالا آرگون را به خوبی نگه می دارند و برای تعیین سن سنگ های قدیمی تر از پالتوسن استفاده می شود.
- نفلین: در سنگ های آذرین درونی و بیرونی برای تعیین سن سنگ های قدیمی استفاده می شود که K_2O حدود ۳ تا ۱۰ درصد است. اگر سنگ ما درجه دگرگونی آن کم باشد باز هم از نفلین می توان استفاده کرد.
- بیوتیت: برای سنگ های آذرین درونی، بیرونی و دگرگونی استفاده می شود.
- مقدار K_2O در حدود ۷ تا ۹ درصد است و برای تعیین سن های مختلف می توان از آن استفاده کرد.
- کوارتز: مناسب نیست و استفاده نمی شود.
- لوسیت: برای تعیین سن سنگ های آتش فشانی و جوان مناسب است چون K_2O حدود ۱۹ تا ۲۰ درصد است.
- مسکوویت: برای تعیین سن سنگ های آذرین درونی، دگرگونی و رگه های گرمایی استفاده می شود. مقدار K_2O در حدود ۸ تا ۱۲ درصد است. پس برای تعیین سن های مختلف می توان از آن استفاده کرد. چون مسکوویت بهتر از بیوتیت آرگون را در خود نگه می دارد بهتر است در سن سنجی از مسکوویت استفاده شود.
- فلوگوپیت و لپیدولیت: فلوگوپیت بیشتر در اسکارن های منیزیم دار دیده می شود و برای تعیین سن اسکارن ها استفاده می شود. لپیدولیت نیز به ندرت در پگماتیت ها دیده می شود.
- گلوکونیت: تن ها کانی است که به کمک آن می توان سن برخی سنگ های رسوبی را تعیین کرد. حاوی ۲ درصد K_2O است و برای سن های قدیمی (میلیون تا میلیارد سالی) از آن استفاده می شود.



- هورنبلند: برای سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی و دگرگون که حاوی ۱ تا ۰/۲ درصد K_2O است و برای سن سنگ‌های اواسط دوران سوم و قدیمی‌تر استفاده می‌شود. از نظر نگهداری آرگون مقاوم‌ترین کانی به شمار می‌رود.
- پیروکسن: در سنگ‌های آذرین درونی، بیرونی و دگرگون دیده می‌شود. میزان K_2O آن کمتر از ۱ درصد است و برای سن‌های قدیمی‌تر از دوران دوم استفاده می‌شود.
- شیشه‌ها مثل افسیدین: شیشه‌ها به شرط جوان بودن و عدم تغییرات شیمیایی و فیزیکی برای این کار مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- سیلویت (KCl): در سنگ‌های رسوبی تبخیری K_2O بسیار بالاست. به دلیل حلالیت بالا برای سن سنجی مناسب نیست.

✓ روش رویدیم - استرانسیم:

- رویدیم از گروه اول جدول تناوبی با شعاعی یونی مشابه پتاسیم، به جای پتاسیم در ساختار کانی‌های پتاسیم دار قرار می‌گیرد. مثل سانیدین، ارتوز، مسکوویت، بیوتیت، فلوگوپیت، هورنبلند و سیلویت
- رویدیم دارای ۲ ایزوتوپ است: ^{85}Rb و ^{87}Rb که رویدیم ۸۵ فراوان‌تر است. رویدیم ۸۷ ناپایدار است و به تدریج تبدیل به استرانسیم ۸۷ می‌شود.
- استرانسیم از گروه دوم جانشین کلسیم از همین گروه می‌شود؛ مثلاً در کانی‌هایی مثل پلاژیوکلاز، کلسیت، آراگونیت، آپاتیت و...
- استرانسیم دارای ۴ ایزوتوپ است: ^{84}Sr و ^{86}Sr و ^{87}Sr و ^{88}Sr که در این میان ^{84}Sr از همه بیشتر و ^{88}Sr از همه کمتر است.
- استرانسیم اینشیال: به مقدار استرانسیم ۸۷ به استرانسیم ۸۶ که در موقع تشکیل سنگ وجود دارد استرانسیم اولیه یا اینشیال می‌گویند. به مرور از ^{84}Rb کاسته شده و به ^{87}Sr افزوده می‌شود.
- یکی از کاربردهای مهم روش رویدیم استرانسیم تعیین منشأ ماگما است.
- در شهاب‌سنگ‌ها نسبت استرانسیم اینشیال پایین و در حدود ۰.۶۹۸ است.
- در جبه در ابتدای تشکیل نسبت استرانسیم اینشیال و در حال حاضر در حدود ۰.۷۰۳ تا ۰.۷۰۵ است.
- در بازالت‌های جزایر اقیانوسی بین ۰.۷۰۳ تا ۰.۷۰۶ است.
- در بازالت‌ها جزایر قوسی و بازالت‌های ریفت‌های درون قاره‌ای بین ۰.۷۰۳ تا ۰.۷۱۵ است. این نسبت در سنگ‌های آتش‌فشانی پایین و در شیل و کربنات با منشأ قاره‌ای بالاست.
- رویدیم به دلیل خاصیت ژئوشیمیایی در پوسته قاره‌ای متمرکز می‌شود. در پوسته قاره‌ای که چندین بار دچار ذوب بخشی شده مقدار رویدیم بیشتر است. بنابراین در سنگ‌های پوسته قاره‌ای نسبت اینشیال بالاتر از ۰.۷۰ است و در سنگ‌هایی که حاصل تفریق ماگمای اولترامافیک باشند این نسبت کمتر از ۰.۷۱ است.



✓ ایزوتوپ‌های پایداری که در زمین‌شناسی مطالعه می‌شوند عبارت‌اند از:

- هیدروژن (H) و دوتریوم (D)
گوگرد ۳۲ (32S) و گوگرد ۳۴ (34S)
اکسیژن ۱۶ (16O) و اکسیژن ۱۸ (18O)
کربن ۱۲ (12C) و کربن ۱۴ (14C)
- ایزوتوپ اکسیژن و هیدروژن:
 - ✓ اکسیژن از فراوان‌ترین عناصر پوسته زمین است که دارای ۳ ایزوتوپ ^{16}O و ^{17}O و ^{18}O است.
 - ✓ ^{16}O از همه بیشتر و ^{17}O از همه کمتر است.
 - ✓ هیدروژن دارای ۲ ایزوتوپ است: ^1H و ^2H (دوتریم D)
- میانگین استاندارد آب‌های اقیانوس:
 - اگر این میانگین مثبت باشد نشانگر افزایش ایزوتوپ‌های سنگین ^{18}O و D است.
 - اگر این میانگین منفی باشد، نشانگر کاهش ایزوتوپ‌های سنگین ^{18}O و D است.
 - برای تعیین منشأ ماگما و محلول‌ها و برای تعیین دمای محلول‌ها استفاده می‌شود.

✿ ژنز و منشأ گرانیته‌ها یا ماگمای اسیدی در پوسته قاره‌ای:

- عوامل مؤثر در ذوب سنگ‌های پوسته قاره‌ای:
 - ضخامت پوسته قاره‌ای به‌طور متوسط ۱۵ تا ۲۰ کیلومتر است. با در نظر گرفتن گرادیان حرارتی (35°C در هر کیلومتر) در عمق ۱۵ تا ۲۰ کیلومتری سنگ‌ها به دمای ۵۲۵ تا ۷۰۰ درجه می‌رسند از آنجا که دمای ذوب سنگ‌ها در حالت خشک با افزایش فشار بالا می‌رود پس در اعماق پوسته در حالت عادی ذوبی صورت نمی‌گیرد. افزایش گرادیان حرارتی یا آب آزاد شده از سیلیکات‌های آبدار می‌تواند باعث ذوب سنگ‌های پوسته قاره‌ای شود.
 - گرادیان حرارتی پوسته‌های قاره‌ای در ریفته‌ها و نقاط داغ به دلیل واقع شدن در چرخه جریان‌های ماگمایی افزایش می‌یابد. بالا آمدن و عبور ماگمای مافیک و اولترامافیک باعث افزایش گرادیان حرارتی و ذوب بخشی می‌شود.
 - دمای ذوب سنگ‌ها در حضور آب کاهش می‌یابد این آب در اعماق زیاد از سیلیکات‌های آبدار آزاد می‌شود. مثل بیوتیت، مسکوویت، آمفیبول، هورنبلند و فلوگوپیت.
 - درصد ذوب بخشی و ترکیب و حجم ماگما در پوسته قاره‌ای بستگی دارد به: ترکیب شیمیایی سنگ مادر، نوع سیلیکات آبدار، حجم آب آزاد شده و فشار و دما در منطقه ذوب.



▪ با گرادیان حرارتی 30°C در هر کیلومتر مسکوویت در دمای 700°C می شکند. بیوتیت در دمای 780°C و فلوگوپیت در دمای 890°C و هورنبلند در دمای 940°C می شکند.

• ویژگی های ماگمایی که مسکوویت در ذوب آن نقش دارد:

- (۱) دما پایین است
- (۲) عمق تشکیل کم است
- (۳) میزان پتاسیم زیاد است
- (۴) نسبت K/Na بیشتر از یک است
- (۵) ترکیب ماگما در محدوده اسیدی است
- (۶) تشکیل باتولیت می دهد (گرانیتی که در عمق سرد می شود)
- (۷) در سنگ حاصله گارنت، مسکوویت، کروندم، آندالوزیت و سیلیمانیت دیده می شود.
- (۸) غنی از آلومینیم است.
- (۹) استرانسیم اینشیال بیشتر از 0.71 است
- (۱۰) فاصل های که ماگما از منشأ تا نقطه نهایی تبلور طی می کند کم است.

• ویژگی ماگمایی که بیوتیت در ذوب آن نقش دارد: (نسبت به گروه قبلی)

- (۱) دما بالاتر است
- (۲) نسبت K/Na کمتر از یک
- (۳) میزان آلومینیم کمتر است ولی نسبت Fe/Mg بیشتر است
- (۴) محدوده ترکیب شامل گرانیت، گرانودیوریت و تونالیت است.
- (۵) تشکیل سنگ های درونی می دهد و در سنگ های این ماگما گارنت و آلانیت دیده می شود.

• ویژگی های ماگمایی که هورنبلند در ذوب آن نقش دارد: (نسبت به گروه قبلی)

- (۱) عمق تشکیل بیشتر
- (۲) دمای اولیه بیشتر
- (۳) ترکیب ماگما شامل دیوریت، تونالیت و گرانودیوریت است.
- (۴) نسبت K/Na کمتر از یک
- (۵) میزان آلومینیم کمتر از قبلی
- (۶) تشکیل سنگ های آتش فشانی و نیمه عمیق می دهد.
- (۷) استرانسیم اینشیال کمتر از 0.71 است.
- (۸) کانی های مگنتیت، هورنبلند و اسفن در این سنگ ها دیده می شود.

• تغییرات ایجاد شده توسط آلومینیم در ماگمای اسیدی:



- ۱) افزایش آلومینیم دمای ذوب و شروع تبلور را کاهش می‌دهد.
- ۲) در سیستم سه تایی آلپیت - ارتوز - اکسید سیلیس، افزایش Al_2O_3 در حالتی که آب در سیستم وجود دارد (فشار مرطوب) دمای نقطه مینیمم را کاهش می‌دهد و ترکیب آن به سمت SiO_2 تغییر می‌کند؛ مثلاً در شرایط اشباع از آب و فشار 2Kb دمای مینیمم گرانیته ساب آلومینیم $685^\circ C$ و گرانیته فوق آلومینیم $660^\circ C$ است. در حالت غیر اشباع از آب و در فشار 2Kb دمای مینیمم برای گرانیته ساب آلومینیم $775^\circ C$ و برای فوق آلومینیم $755^\circ C$ است.
- ۳) حلالیت آب در ماگما رابطه مستقیم با میزان آلومینیم دارد. (گرانیته فوق آلومینیم آب بیشتری حل می‌کند)
- ۴) حلالیت عناصر با ظرفیت بالا مثل Fe^{3+} و Ti^{4+} و Sr^{4+} و... در ماگمای پرآلکالین نسبتاً زیاد و در ماگمای آلومینیم دار کم است.
- ۵) میزان FeO با افزایش آلومینیم تغییر نمی‌کند.
- ۶) نسبت FeO/MgO در گرانیته فوق آلومینیم کمتر از ساب آلومینیم است.

• نقش اکسید فسفر در ماگمای اسیدی یا حد واسط (P_2O_5) :

- ۱) P_2O_5 در گرانیته فوق آلومینیم بیشتر از ساب آلومینیم است.
- ۲) تغییرات P_2O_5 در گرانیته فوق آلومینیم توسط کلسیم کنترل می‌شود. در صورت غنی بودن ماگما از کلسیم میزان P_2O_5 با افزایش SiO_2 کاهش می‌یابد. (چون تشکیل کانی آپاتیت می‌دهد) در صورتی که کلسیم کم باشد میزان P_2O_5 با افزایش SiO_2 افزایش می‌یابد و در نهایت وارد شبکه فلدسپات‌ها می‌شود.
- ۳) میزان P_2O_5 ماگمای اسیدی با افزایش ضریب شاند افزایش می‌یابد.

• نقش فلوئور (F) در ماگمای اسیدی و حد واسط:

- ۱) دما و ترکیب نقطه مینیمم در سیستم آلپیت ارتوز - اکسید - سیلیس، با افزایش فلوئور کاهش می‌یابد؛ مثلاً در فشار یک کیلو بار بخار آب بدون فلوئور دمای نقطه مینیمم $730^\circ C$ و ترکیب آن شامل ۳۸ درصد کوارتز و ۳۳ درصد آلپیت و ۳۹ درصد ارتوز است.
- اگر فلوئور ۴ درصد باشد دمای نقطه مینیمم $630^\circ C$ می‌شود و ترکیب شامل ۱۵ درصد کوارتز و ۵۸ درصد آلپیت و ۲۷ درصد ارتوز می‌شود.
- ۲) مقدار آبی که در ماگما حل می‌شود با افزایش فلوئور افزایش می‌یابد.
- ۳) افزایش فلوئور غلظت ماگما را افزایش می‌دهد.

• نقش بور (B) در ماگمای اسیدی و حد واسط:

- ۱) باعث کاهش غلظت ماگما می‌شود.
- ۲) دمای ذوب و تبلور را کاهش می‌دهد.



- (۳) ترکیب نقطه مینیمم به سمت غنی شدن از آلیت حرکت می کند.
- (۴) میزان حلالیت آب را افزایش می دهد. بور در سنگ های گرانیتی به صورت تورمالین دیده می شود خصوصاً در لوکوگرانیت های غنی از آلومینیم

• نقش آهن در ماگمای گرانیتی:

- (۱) میزان آهن گرانیت ساب آلومینیم و فوق آلومینیم با افزایش دما افزایش می یابد. میزان آب هیچ تأثیری در مقدار آهن ندارد.
- (۲) فوگاسیته O (فشار گاز اکسیژن) نسبت Fe^{2+}/Fe^{3+} را کنترل می کند. در حالت احیایی Fe^{2+} وارد کانی ها می شود (به صورت اکسید آهن و تیتان مثل ایلمنیت) و در حالت اکسیدان Fe^{3+} وارد کانی ها می شود (به صورت مگنتیت)
- (۳) در گرانیت فوق آلومینیم نسبت آهن به منیزیم در مقایسه با گرانیت ساب آلومینیم کمتر است.

• نکته:

- غلظت ماگما با میزان آب موجود در آن رابطه عکس دارد.
- افزایش بور و فلئوئور باعث کاهش غلظت ماگما می شود.
- افزایش آلومینیم باعث کاهش غلظت ماگما می شود.
- درصد بلورها با غلظت رابطه مستقیم دارد.
- غلظت ماگما با حباب های گاز رابطه مستقیم دارد.
- گاز محلول با غلظت رابطه عکس دارد.

✿ منشأ ماگمای تولیتی در زون فرورانش:

- بازالت های تولیتی در زون فرورانش نسبتاً فراوانند. اولین سری در کمرندهای آتش فشانی، آذرین درونی می باشند. در نزدیکی زون فرورانش تشکیل می شوند اما نسبت به ماگمای کالکوآلکان و آلکان در عمق کمتری تشکیل می شوند.
- مطالعاتی که در خصوص منشأ انجام شده:
- ابتدا پریدوتیت را در فشار معادل ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتری و گرادیان حرارتی معادل آن قرار دادند، هیچ ذوبی صورت نگرفت. سپس بازالت را در دما و فشار گفته شده قرار دادند. این بار هم هیچ ذوبی صورت نگرفت ولی بازالت به اکلوزیت دگرگون شد. با اضافه کردن آب سنگ پریدوتیتی ذوب شد اما اکلوزیت ذوب نشد پس ماگمای تولیتی حاصل ذوب پریدوتیت در مجاورت آب در فشار ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتری و دمای $650^{\circ}C$ است.
- پوسته اقیانوسی که بخش فوقانی آن بازالت است تحت تأثیر دگرگونی به آمفیبولیت تبدیل می شود. آمفیبولیت در عمق ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتری به اکلوزیت تبدیل می شود. آب آزاد شده از هورنبلند دمای ذوب پریدوتیت های واقع در



بخش فوقانی پوسته اقیانوسی را کاهش می دهد و از ذوب آن ها ماگمای تولییتی تولید می شود. پس نقش زون فرورانش در این عمق آزاد نمودن آب و کاهش دمای ذوب سنگ های جبه است. در مناطقی که زاویه زون فرورانش کم است پوسته اقیانوسی نمی تواند به عمقی برسد که هورنبلند شکسته شود و آب آزاد شده از آن بتواند سنگ های منطقه را ذوب کند پس ماگماتیسیم دیده نمی شود.

منشأ ماگمای کالک آلکالن در زون فرورانش:

سنگ های کالک آلکالن تا به امروز فقط در زون فرورانش شناخته شده اند. بر اساس مطالعات رینگ وود پوسته اقیانوسی از بالا به پایین شامل سه بخش اصلی است:

(۱) بخش رسوبی

(۲) بخش بازالتی

(۳) سنگ های اولترامافیک

بخش بازالتی به دلیل دگرگونی، سرپانتینیزه می شود. بازالت را تحت فشار و حرارت قرار داده اند. پلاژیوکلاز ابتدا تبدیل به اسپیدن و سپس تبدیل به گارنت شد پس بازالت در فشار بالا به اکلوزیت تبدیل می شود. در عمق ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتری آب آزاد شده از هورنبلند نقطه ذوب سنگ های واقع در بالای پوسته اقیانوسی را کاهش داده و ماگمای تولییتی ایجاد می کند.

قسمتی از این آب به صورت سیلیکات های آبدار فشرده به اعماق بیشتر حمل می شود و در عمق ۱۵۰ کیلومتری آب خود را از دست داده و نقطه ذوب اکلوزیت پایین می آید. از ذوب اکلوزیت ماگمای ریوداسیتی و ریولیتی تولید می شود که ترکیب کالک آلکالن ندارند. بنابراین اگر در مجاورت سنگ های گوشته قرار گیرند سنگی به نام گارنت پیروکسنیت تولید می کند که وزن مخصوص کم داشته و به صورت دیاپیر بالا می آید و شروع به ذوب می کند. ماگمای تولید شده ترکیب کالک آلکالن خواهد داشت.

منشأ ماگمای آلکالن در زون فرورانش:

در اعماق بیش از ۱۵۰ کیلومتر در زون فرورانش آب آزاد شده از سیلیکات های آبدار فشرده، دمای ذوب باقی مانده اکلوزیت را کاهش می دهد و ماگمای آلکالن تولید می کند.

منشأ ماگما در زون گسترش میان اقیانوسی:

بازالت های زون گسترش میان اقیانوسی را با علامت MORB نشان می دهند.

(mide oceanic ridg basalt) این بازالت ها عمدتاً مربوط به سری تولییتی و به مقدار کم در سری آلکالن می باشند.

بازالت های زون گسترش از نظر عناصر اصلی تفاوت زیادی با بازالت های جزایر قوسی و جزایر اقیانوسی و ریفت های درون قاره ای ندارند؛ اما میزان پتاسیم - روییدیم - باریم - استرانسیم - فسفر و تیتانیوم در آن ها بیشتر است.



- برای سنجش میزان تفریق از نسبت $(M = Mg / (Mg + Fe) \times 100)$ استفاده می‌شود. اگر M حدود ۷۰ باشد ماگما منشأ گوشته دارد، اولیه است و دچار تفریق نشده است. در MORB این مقدار در حدود ۵۵ تا ۶۵ است پس ماگمای اولیه تحت تأثیر تفریق قرار گرفته. بر اساس عناصر فرعی و کمیاب بازالت‌های میان‌اقیانوسی به دو نوع تقسیم‌بندی می‌شوند.
 - N: نرمال (تهی شده) ← از اقیانوس آرام
 - P: غنی شده ← از زون گسترش گالاپاگوس
- در نوع دوم عناصر پتاسیم و روبیدیم و باریم از نوع اول بیشتر است. همچنین در بازالت‌های نوع نرمال عناصر کمیاب سبک در مقایسه با عناصر سنگین کمیاب کاهش نشان می‌دهد. در حالی که در نوع P عناصر کمیاب سبک در مقایسه با عناصر سنگین غنی شدگی نشان می‌دهد. این مسئله نشانگر آن است که بازالت N از جبهه فوقانی که دارای تهی شدگی است منشأ گرفته است ولی بازالت نوع P از عمق بیشتر و سنگ منشأ غنی تر تشکیل شده است.
- بر اساس عناصر کمیاب و فرعی، ایزوتوپ‌ها و اطلاعات ژئوفیزیکی، بازالت‌های میان‌اقیانوسی نتیجه ذوب دیاپیرهایی هستند که منشأ آن‌ها از استئوسفر است این دیاپیرها در محدوده عمق اسپینل - پلاژیوکلاز - پریدوتیت (عمق ۶۰ تا ۷۰ کیلومتری) شروع به ذوب می‌کنند. عوامل مهم ذوب عبارت‌اند از:
 - ۱) کاهش دمای ذوب دیاپیرها در اثر کاهش فشار حین بالا آمدن توده
 - ۲) بالا بودن گرادیان حرارتی در زون گسترش میان‌اقیانوسی

✿ بازالت‌های جزایر اقیانوسی:

- بازالت‌های نقاط داغ درون صفحه‌های اقیانوسی را با علامت OIM نشان می‌دهند.
- هر دو نوع بازالت تولیتی و آلکالن در آن‌ها دیده می‌شود. مقدار عناصر پتاسیم، روبیدیم، باریم، زیرکونیم و نئوبوم در این بازالت‌ها از نوع MORB بیشتر است. ماگمای جزایر اقیانوسی نتیجه ذوب و اختلاط چند ماگما است.
- موادی که در تشکیل این ماگما مشارکت دارند عبارت‌اند از:
 - الف) استئوسفر تحتانی دارای غنی شدگی
 - ب) استئوسفر فوقانی دارای تهی شدگی
 - ج) لیتوسفر با تهی شدگی
 - د) بقایای پوسته اقیانوسی
- ماگمای تولیتی حاصل درصد ذوب بالا حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد در عمق کم است
- ماگمای آلکالن حاصل درصد ذوب کم حدود ۵ تا ۱۵ درصد در عمق بیشتر است
- علت اصلی ذوب حرکت دیاپیرها به سمت بالا و کاهش فشار است. عمق منشأ دیاپیرها حدود ۷۰۰ کیلومتر و در حد فاصل جبهه تحتانی و جبهه فوقانی است.
- نقش گاز CO₂ در ترکیب بازالت: پریدوتیت را در فشار ۱۰ تا ۱۵ کیلو بار با نسبت‌های مختلف CO₂ ذوب کردیم. نتایج زیر به دست آمد:



- اگر نسبت H_2O / CO_2 بالا باشد ← ماگما آندزیتی می شود.
- اگر نسبت H_2O / CO_2 متوسط باشد ← ماگما الیوین - تولیت می شود.
- اگر نسبت H_2O / CO_2 کم باشد ← ماگما الیوین نفلینیت یا ملی لیت می شود.

• نتیجه گیری: ماگمای تحت اشباع از سیلیس در شرایط زیر ایجاد می شود:

- (۱) درصد ذوب کم پریدوتیت
- (۲) فشار یا عمق زیاد
- (۳) نسبت H_2O / CO_2 کم

• ماگمای اشباع از سیلیس در شرایط زیر ایجاد می شود:

- (۱) درصد ذوب زیاد
- (۲) فشار یا عمق کم
- (۳) نسبت H_2O / CO_2 زیاد

⊗ کیمبرلیت ها:

- سنگ های آذرین اولترامافیک و غنی از پتاسیم. K_2O بیشتر از ۳ درصد و MgO هم بیشتر از ۳ درصد. نسبت K_2O / Na_2O بیشتر از ۲ است.

⊗ لامپروئیت ها:

(۱) به صورت دایک دیاترم و گدازه دیده می شوند و حاوی الماس هستند.

- خصوصیات ژئوشیمیایی:

- Na_2O کمتر از ۲ درصد - Al_2O_3 کمتر از ۱۲ درصد - CaO کمتر از ۸ درصد
- از نظر کانی شناسی دارای فلوگوپیت غنی از تیتانیوم - دیوپسید با آلومینیوم کم - لوسیت و آمفیبول با آلومینیوم کم - الیوین، سانیدین غنی از آهن و فاقد پلاژیوکلاز - نفلین و ملی لیت

(۲) کامافوسیت ها: به صورت دایک و گدازه دیده می شوند.

- خصوصیات ژئوشیمیایی:

- Al_2O_3 کمتر از ۱۲ درصد، CaO بیش از ۱۰ درصد، SiO_2 کمتر از ۴۰ درصد Na_2O کمتر از ۱/۳۸ درصد

- از نظر کانی شناسی دارای الیوین، فلوگوپیت، کلینوپیروکسن، لوسیت، ملی لیت، پرووسکیت و کالسلیت (ایزومورف نفلین) است.

- تفاوت با لامپروئیت ها در داشتن ملی لیت و کالسلیت و نداشتن سانیدین است.



- منشأ کیمبرلیت ها: ماگمای کیمبرلیتی دارای چند ویژگی است:
 - (۱) اولترامافیک غنی از پتاسیم
 - (۲) غنی از گازهای CO_2 و H_2O
 - (۳) Na_2O نسبتاً کم است
 - (۴) $\text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$ زیاد است.
 - (۵) غنی از عناصر ناسازگار
 - (۶) حاوی سینیولیت ها و سینیو کریست ها ی مختلف از جبه و پوسته قارهای
- در فشار بیش از ۲۰ کیلو بار CO_2 به صورت کانی دولومیت تشکیل می شود. در فشار بیش از ۲۷ کیلو بار دولومیت به منیزیت تبدیل می شود. در فشار ۲۲/۵ کیلو بار آمفیبول شکسته می شود و کانی فلوگوپیت در حضور آب تشکیل می شود. پریدوتیت حاوی دولومیت یا منیزیت در اعماق زیاد با درصد ذوب کم ماگمای کیمبرلیتی تولید می کند. کیمبرلیت های حاوی الماس باید در عمق بیشتر از ۱۳۵ کیلومتری تشکیل شده باشند.
- در شرایط ذوب کم ماگمای کربوناتیتی و با افزایش درصد ذوب ماگمای کیمبرلیتی تشکیل می شود. عمق تشکیل کیمبرلیت ها در محدوده گارنت لرزولیت است.
- نتیجه گیری:
 - بازالت تولییتی در عمق کمتر از ۱۵ کیلو بار فشار؛
 - بازالت آلکالن در عمق ۱۵ تا ۲۵ کیلو بار فشار؛
 - ماگمای کربوناتیتی در عمق ۳۰ تا ۳۵ کیلو بار فشار؛
 - ماگمای کیمبرلیتی در عمق بیشتر از ۴۰ کیلو بار تشکیل می شود.

فهرست منابع:

- ۱- پترولوژی تجربی، دکتر علی درویش زاده - دانشگاه تهران؛
- ۲- پترولوژی سنگ های آذرین، دکتر کریم پور - دانشگاه فردوسی مشهد؛
- ۳- پترولوژی، دکتر علی درویش زاده - دانشگاه پیام نور؛
- ۴- پترولوژی سنگ های دگرگونی، دکتر معین وزیری - دانشگاه تربیت معلم.

