

# Metamorfizma Basınç Ve Sıcaklık Koşullarının Belirlenmesi (Jeotermobarometre): Yıldızeli (Sivas Batısı) Yöresinde Bir Uygulama

Musa ALPASLAN  
Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas  
Durmuş BOZTUĞ  
Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas

## GİRİŞ

Metamorfik kayaçların çalışılmasında günümüze kadar kullanılan klasik petrografik incelemeler sonucu elde edilen izograd haritaları yardımıyla, çalışılan bölgedeki metamorfizmanın basınç ve sıcaklık koşullarına bir yaklaşımda bulunulabilmektedir. Buna karşın, jeokimyasal analiz tekniklerinin gelişmesiyle birlikte bir kayaç içerisindeki tek bir mineralin ve çevresinde yer alan diğer minerallerin kimyasal birleşimlerinin belirlenmesi olanaklı olmuştur. Dolayısıyla, bir kayaç içerisindeki minerallerin kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi ve bunlar arasındaki reaksiyon dokularının çalışılması, metamorfik petrografinin ileri ve temel unsurları arasında yerini almıştır. Bu analizlerin gerçekleştirilmesi için ise Elektron Prob Mikro Analiz (EPMA veya EMA) yöntemi olarak isimlendirilen nokta analiz yöntemleri kullanılmaktadır.

Metamorfizmada etkin olan basıncın belirlenmesi jeobarometre olarak isimlendirilmekte ve met dönüşüm reaksiyonlarından gidilerek hesaplanmaktadır. Metamorfizmanın sıcaklık koşullarının her ikisinin birden belirlenmesi yöntemi kısaca **Jeotermobarometre** olarak isimlendirilmektedir.

Termobarometre hesaplamaları kesin ve görel termobarometre olarak iki türde yapılabilmektedir. Kesin termobarometre hesaplamaları, kayaç içerisindeki mineraller arasındaki reaksiyonlardan gidilerek katyon değişim oranlarının belirlenmesinden itibaren hesaplanmaktadır. Görel termobarometre yöntemi ise daha yaygın olarak zonlanma gösteren granat gibi minerallerin kimyasal bileşimlerinin belirlenerek kristalleşme koşullarının ve dolayısı ile P-T evrim yolunun belirlenmesi ilkesine dayanmaktadır. Bu derleme çalışmasında,

jeotermobarometre hesaplamaları ile ilişkili yöntemler kısaca anlatılmaya çalışılacak ve Yıldızeli yöresinde yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar örnek olarak verilecektir. Metamorfik kayaçlarda, metamorfizma basınç ve sıcaklık koşullarının belirlenmesi için kullanılan mineral parajenezlerinden bazıları şunlardır;

### Jeobarometreler:

Granat - rutil - ilmenit - alüminyum silikat - kuvars (Böhlen ve diğ. 1983a),

Granat - plajiyoklaz - ortopiroksen - kuvars (Newton ve Parkins 1982; Böhlen ve diğ. 1983c),

Granat - plajiyoklaz - kuvars - klinopiroksen (Parkins ve Newton 1981),

Granat - sillimanit/disten - kuvars - plajiyoklaz (Newton ve Haselton 1981; Anovitz ve Essene 1987; Koziol ve Newton 1988),

Ortopiroksen - granat (Harley ve Green 1982; Harley 1984a),

Granat - kordiyerit - sillimanit - kuvars (Hensen ve Green 1973; Aranovich ve Podlesskii 1983),

Biyotit - muskovit - klorit - kuvars (Powell ve Evans 1983; Nurminen 1987),

Plajiyoklaz - hornblend (Plyusnina 1982),

Fenjit (Masonne ve Schreyer 1987),

### Jeotermometrede kullanılan parajenezler:

Granat - klinopiroksen (Ellis ve Green 1979),

Granat - ortopiroksen (Harley 1984b; Lee ve Ganguly 1988),

Granat - biyotit (Ferry ve Spear 1978),

Granat - kordiyerit (Thompson 1976; Perchuk ve Lavrent'eva 1983),

Granat - amfibol (Graham ve Powell 1984),

Ortopiroksen - klinopiroksen (Lindsley 1983)

## JEOTERMOBAROMETRE

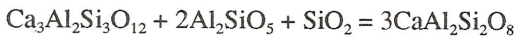
### ÇALIŞMALARINDA KULLANILAN REAKSİYONLAR

Bu bölümde jeotermobarometre çalışmalarında kullanılan ve deneysel olarak hangi koşullarda gerçekleştiği belirlenmiş olan reaksiyonlar topluca verilecektir. Ayrıntılı bilgi için verilen referanslara bakılabilir.

#### Tek Değişkenli Reaksiyonlar

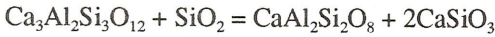
Çeşitli metamorfik fasiyeslerin jeotermobarometre koşullarının belirlenmesinde kullanılan mineral reaksiyonları şunlardır:

(1) Grossular + disten + kuvars = anortit



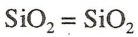
[GASP, Goldsmith, 1980; Gasparik, 1984; Chatterjee ve diğ., 1984; Koziol ve Newton, 1988],

(2) Grossular + kuvars = anortit + vollastonit



[WAGS, Newton, 1966; Gasparik, 1984; Chatterjee ve diğ. 1984],

(3) Kuvars = koesit



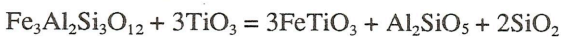
[Mirwald ve Masonne, 1980; Bohlen ve Boettcher, 1982],

(4) Yadeyit + kuvars = albit



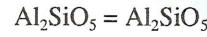
[Johannes ve diğ., 1971; Holland, 1980],

(5) Almandin + rutil = ilmenit + disten / sillimanit + kuvars



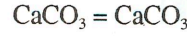
[GRAIL, Bohlen ve diğ., 1983a],

(6) disten = sillimanit = andaluzit



[Holdaway, 1971; Robie ve Hemingway, 1984; Salje, 1986]

(7) Aragonit = kalsit



[Crawford ve Fyfe, 1965; Johannes ve Puhan, 1971].

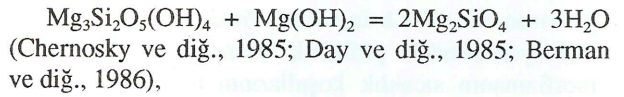
Yukarıda verilen 7 reaksiyon, özellikle diğer termobarometrelerle birlikte kullanıldığında, yeterli termobarometrik bilgiyi oluşturabilir. Termobarometre için kullanışlı olan diğer basit reaksiyonlar ise dehidratasyon ve/veya dekarbonizasyon reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonlarda; dehidratasyon reaksiyonları için  $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_s$ , dekarbonizasyon reaksiyonları için  $P_{\text{CO}_2}/P_s$  ve akışkan türlerinin her ikisini de içeren reaksiyonlar için ise  $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{CO}_2}/P_s$  hakkında yeterli bilgilerin bulunması gerekmektedir. (Greenwood, 1962; Kerrick ve diğ., 1974; Flowers ve Hengleson, 1983). Örneğin; en düşük derecelerde, akışkanların düşey yöndeki hareketinin bir sonucu olarak  $P_f$ ,  $P_s$  den önemli ölçüde düşüktür ve  $P_f$  in önemli bir kısmını  $P_{\text{CH}_4}$  oluşturmaktadır. Üst amfibolit ve granulit fasiyesi koşullarında ise  $P_{\text{H}_2\text{O}}, P_s$  den önemli ölçüde daha az olmaktadır (Essene, 1989).

#### Basit Kimyasal Sistem Reaksiyonları

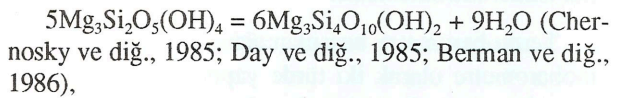
Basit kimyasal sistem olarak oluşan bazı reaksiyonlar, termobarometre için kullanışlı olabilmektedir. Bu reaksiyonların başlıcaları şunlardır:

##### MgO - SiO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O

(8) Antigorit - brusit = forsterit + su buharı

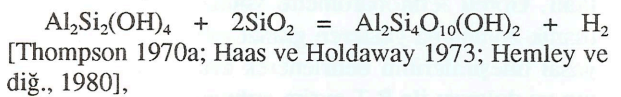


(9) antigorit = forsterit + talk + su buharı



##### Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O

(10) kaolinit = pirofillit + su buharı



(11) pirofillit = alüminosilikat + kuvars + su buharı



$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 = Al_2SiO_5 - 3SiO_2 + H_2O$  [Haas ve Hold away 1973; Hemley ve diğ., 1980],

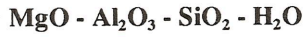


(12) kalsit + kuvars = vollastonit + karbondioksit

$CaCO_3 + SiO_2 = CaSiO_3 + CO_2$  [Greenwood 1967; Tanner ve diğ., 1985],

(13) vollastonit + kalsit = tilleyit + karbondioksit

$2CaSiO_3 + 3CaCO_3 = Ca_5Si_2O_7(CO_3)_2$  (Treiman ve Essene 1983),



(14) klinoklor = forterit + enstatit + spinel + su buharı

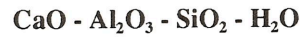
$Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8 = Mg_2SiO_4 + 2MgSiO_3 + MgAl_2O_4 + CO_2$

[Fawcett ve Yoder 1966; Staudigel ve Schreyer 1977],

(15) Mg - kloritoyid + kuvars = talk + disten + su buharı

$3MgAl_2SiO_5(OH)_4 + 4SiO_2 = Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 + 3Al_2SiO_5 + 5H_2O$

[Schreyer ve Seifert, 1969; Seifert, 1974; Chopin ve Schreyer, 1983],



(16) margarit + kuvars = anortit + alüminosilikat + su buharı

$CaAl_4Si_2O_{10}(OH)_2 + SiO_2 = CaAl_2Si_2O_8 + Al_2SiO_5 + H_2O$

[Chatterjee 1976],

(17) margarit + kuvars = zoyisit + disten + su buharı

$4CaAl_4SiO_{10}(OH)_2 + 3SiO_2 = 2CaAlSi_3O_{12}(OH) + 5Al_2SiO_5 + 3H_2O$

[Perkins ve diğ., 180; Nitsch ve diğ., 1981; Jenkins 1984],

(18) prehnit = grossular + zoyisit + kuvars + su buharı

$5Ca_2Al_2Si_3O_{10}(OH)_2 = 2Ca_3Al_2Si_3O_{12}$

$+ 2Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH) + 3SiO_2 + 4H_2O$

[Liou 1971a; Perkins ve diğ., 1980],

(19) prehnit = grossular + lavsonit + kuvars

$2Ca_2Al_2Si_3O_{10}(OH)_2 = Ca_3Al_2Si_3O_{12} + CaAl_2Si_2O_7(OH)_2 \cdot 7H_2O + SiO_2$

[Perkins ve diğ., 1980],

(20) zoyisit + disten + kuvars = anortit + su buharı

$2Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH) + Al_2SiO_5 + SiO_2 = 4CaAl_2Si_2O_8 + H_2O$

[Jenkins ve diğ., 1983,1985],

(21) klinozoyisit + disten + kuvars = anortit + su buharı

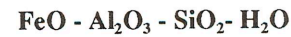
$2Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH) + Al_2SiO_5 + SiO_2 = 4CaAl_2Si_2O_8 + H_2O$

[Jenkins ve diğ., 1983,1985],

(22) lavsonit + kuvars + su buharı = lömontit

$CaAl_2Si_2O_7(OH)_2 \cdot 7H_2O + 2SiO_2 + 2H_2O = CaAl_2Si_4O_{12} \cdot 4H_2O$

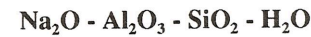
[Thompson 1970b, Liou 1971b],



(23) almadin + sillimanit + kuvars + su buharı = Fe - kordiyerit

$2Fe_3Al_2Si_3O_{12} + 4Al_2SiO_5 + 5SiO_2 + nH_2O = 3Fe_2Al_4Si_5O_{18} \cdot nH_2O$

[Richardson 1968, Weisbrod 1973],



(24) paragonit + kuvars = albit + alüminosilikat + su buharı

$NaAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + SiO_2 = Al_2SiO_5 + NaAlSi_3O_8 + H_2O$

[Chatterjee 1972],

(25) yadeyit + disten + kuvars + su buharı = paragonit

$NaAlSi_2O_6 + Al_2SiO_5 + SiO_2 + H_2O = NaAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$

[Holland 1979],

(26) analsim + kuvars = albit + su buharı

$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O + SiO_2 = NaAlSi_3O_8 + H_2O$  [Liou 1971c, Thompson 1971],

(27) yadeyit + su buharı = analsim

$\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 + \text{H}_2\text{O} = \text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$  [Newton ve Kennedy 1968, Manghnani 1970],

**$\text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$**

(28) muskovit + kuvars = alüminosilikat + sanidin + su buharı

$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2 = \text{Al}_2\text{SiO}_5 + \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}_2\text{O}$

[Storre ve Karotke 1971, Kerrick 1972, Day 1973, Schramke ve diğ., 1987],

**$\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$**

(29) Grunerit = ferrosilit + kuvars + su buharı

$\text{Fe}_7\text{Si}_3\text{O}_{22}(\text{OH})_2 = 7\text{FeSiO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  [Miyano ve Klein 1986],

**$\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$**

(30) tremolit + kalsit + kuvars = diyopsit + akışkan

$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2 + 3\text{CaCO}_3 + 2\text{SiO}_2 = 5\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + \text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2$

[Slaughter ve diğ., 1975; Eggert ve Kerrick 1981],

(31) diyopsit + forsterit + kalsit = montisellit + karbondioksit

$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + \text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 2\text{CaCO}_3 = 3\text{CaMgSiO}_4 + 2\text{CO}_2$  [Sharp ve diğ., 186],

### **BELİRLİ METAMORFİK FASİYESLERİN JEOTERMOBAROMETRİK DEĞERLERİNİN TANIMLANMASINDA KULLANILAN MİNERAL REAKSİYONLARI**

Metamorfizma basınç ve sıcaklık koşullarının belirlenmesi amacıyla kullanılan termobarometreler fasiyesten fasiyese değişiklik göstermektedir. Örneğin; düşük sıcaklık metamorfizminde, kabul edilebilir termodinamik ve deneysel verilerin bulunduğu düşük simetrik sulu silikatlar bol miktarda görülmektedir. Orta sıcaklıktaki metamorfik kayalarda ise, çoğunlukla granat, epidot ve hornblend gibi refrakter minerallerdeki karmaşık zonlanma ile dahada karmaşılaştırılmış kompleks bir P-T geçmişi korunabilmektedir. Büyük ölçüde basit - susuz silikatlardan ve hornblend/biyotit gibi kompleks sulu silikatlardan oluşan yüksek sıcaklıktaki metamorfizma ise progressif metamorfik geçmişi pek koruyamamaktadırlar. Çünkü bu metamorfizma sırasında etkin olan en yüksek P-T koşullarını maskeleyen retrograd dönüşümlere uğramışlardır.

### **Zeolit Fasiyesi**

Zeolit fasiyesinin basınç ve sıcaklık koşullarını belirlemek amacıyla bazı araştırmacılar vitrinit refleksiyon yöntemi, sıvı kapanım ve silikat mineralojisine yönelik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu fasiyesin koşullarının belirlenmesi açısından zeolitlerin ve prehnitin duraylılıkları üzerine geliştirilen çalışmaların kullanışlı olabileceği ileri sürülmektedir (Liou 1971a-b). Ancak, burada doğal ve sentetik fazların düzeni/düzensizliği ve kimyası hakkında belirsizlikler bulunmaktadır (Essene, 1989). Dahası, bu dehidratasyon dengesinin lokasyonları, açık kırık sistemlerine, yüksek derecede tuzlu akışkanların varlığına ve düşük derecede metamorfize olmuş karbonlu litolojilerindeki yüksek  $\text{CH}_4$  e bağlı olarak  $P_{\text{H}_2\text{O}} < P_s$  tarafından şiddetli bir şekilde etkilenmektedirler. Araştırmacılar, diyajenez, hidrotermal sistemler ve düşük dereceli metamorfizmalarda yaptıkları çalışmalarda termometre olarak illit kristalinitesi (Kubler 1967; Kisch 1980a-b, 1981, 1987; Frey ve diğ., 1980; Thompson ve Frey 1984), vitrinit yansıması (Kisch 1980a-b, 1981, 1987; Frey ve diğ., 1980; Teichmüller 1987) ve konodont renk indisini (Rejebian ve diğ., 1987) kullanmışlardır. Ancak bu termometrelerin, metamorfizma koşullarının belirlenmesi açısından bazı güçlükleri olduğu bilinmektedir. Örneğin, izokimyasal olmayan illitin oluşması ve ayrışması reaksiyonları, feldispatları veya alkali metal iyonlarını ve smektiti, illit ve detritik yüksek sıcaklık feldispatlarının içerildiği reaksiyonları kapsayabilir (Ahn ve Peacor 1986). Diğer taraftan vitrinit yansımasına gelince; grafitleşme derecesi düşük sıcaklıklarda deformasyonla artmaktadır. Kontakt hallerde bölgesel metamorfizmalardaki grafitleşme daha geç olmaktadır ve modal karbon, metan uçuculuğu ve geçirgenlikle korele edilebilmektedir (Itaya 1981; Wintsch ve diğ., 1981; Okuyama - Kusunose ve Itaya 1987). Benzer problemler konodont renk indisi için de geçerlidir (Rejebian ve diğ., 1987).

Yukarıda sayılan bu yöntemlerin yanısıra, düşük dereceli metamorfik kayalarda termobarometre çalışması, bu kayalardaki mineraller arasındaki duraylı izotop fraksiyonlanmasından da elde edilebilmektedir (Friedman ve O'neil 1977; Bottinga ve Javoy 1987).

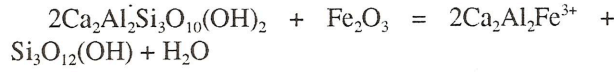
Analim + kuvarsın duraylılığı zeolit fasiyesinin termal sınırlarını oluşturabilir (reaksiyon 26). Bu reaksiyonun termal sınırı  $180^\circ\text{C}$  dir (Liou 1971c). Buna karşın, birçok zeolit pümpelliye fasiyesi sınırları içinde de duraylı olabilir.



### Pümpelliyit Fasiyesi

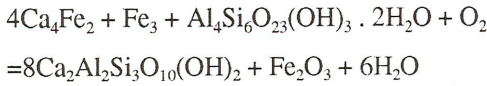
Kalsit - dolomit ve duraylı izotop termometresi yararlı termometrik bilgi oluşturabilmekle birlikte pümpelliyit fasiyesi için birkaç sistem kullanışlı termometre oluşturabilir. Reaksiyon 18 ve 19, prehnitin üst duraylılık sınırını oluşturmaktadır (Essene 1989). Düşük sıcaklık metamorfik sistemlerine uygulanabilen epidot - prehnit dengesi hakkındaki veri, termometre olarak kullanılabilir. Bu denge hakkındaki deneysel veri Liou ve diğ., (1983) tarafından elde edilmiştir:

(32) prehnit + hematit = epidot + su buharı

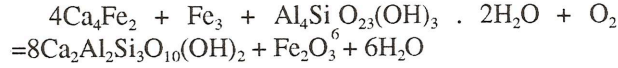


Yukarıda verilen bu denge, basitliğinden ve pümpelliyit fasiyesinde hematitin yaygın bir şekilde oluşmasından dolayı termometre olarak kullanılabilir. Demir - pümpelliyitin duraylılığı şu reaksiyonlarla verilmektedir:

(33) demir-pümpelliyit+oksijen=epidot+su buharı



(34) demir - pümpelliyit + oksijen = prehnit + hematit + su buharı



Reaksiyon (33)'ün sıcaklık aralığı 250 - 300°C arasındadır (Liou 1979). Pümpelliyit fasiyesinin P-T sınırları 5 kb'dan düşük basınçlarda 200 - 300°C arasındadır (Essene 1989).

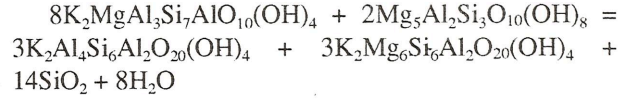
### Yeşilşist Fasiyesi

Yeşilşist fasiyesindeki termobarometrik çalışmalar daha yüksek dereceli metamorfik kayalardan daha azdır. Granat - biyotit (Ferry ve Spear 1978; Ferry 1980, 1984; Hodges ve Spear 1982) veya kalsit - dolomit (Ferry 1979; Nesbitt ve Essene 1982; Di Pisa ve diğ., 1985; Anovitz ve Essene 1987a) termometrelerin dışında bu fasiyeste kullanılması için birkaç termobarometre daha düzenlenmiştir. Diğer taraftan, bu fasiyesin sıcaklık limitlerini daha iyi tanımlamak için duraylı izotop jeokimyası çalışmaları da gereklidir. Basit dehidratasyon reaksiyonları yeşilşist fasiyesi kayalarına nadiren uygulanabilmektedir (Essene 1989).

Powel ve Evans (1983) aşağıdaki reaksiyona göre

bir barometre önermiştir:

(35) fenjit + klorit = muskovit + filogopit + kuvars + su buharı



Yeşilşist fasiyesinin termobarometresi 300 - 550°C lik bir sıcaklığı ileri sürmektedir.

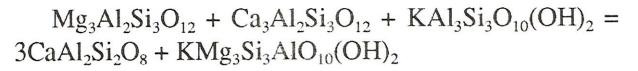
Yeşilşist - amfibolit fasiyesi sınırı 450 - 550°C arasında değişebilir (Essene 1989).

### Amfibolit Fasiyesi

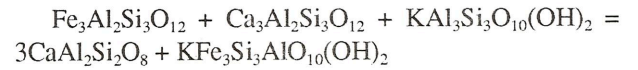
Amfibolit fasiyesinde termobarometre kullanılarak yapılan modern petrolojik çalışmalar çok yaygındır. Bu fasiye için Ferry ve Spear (1978) in granat - biyotit termometresi, doğal ve sentetik fazların benzer olmasından dolayı çok kullanışlıdır. Ancak, burada biyotitteki  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  ve O/OH in rolüne dikkat edilmelidir. Kalsit - dolomit termometresinin ise pik metamorfik sıcaklıkları verebileceği ileri sürülmektedir (Essene 1983).

Ghent ve Stout (1981) granat - muskovit - plajikyoklaz - biyotit topluluğunu baz alarak amfibolit fasiyesi için alternatif barometre geliştirmiştir:

(36) pirop + granat + muskovit = anortit + filogopit

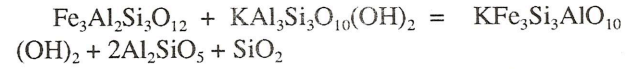


(37) almadin + grossular + muskovit = anortit + annit



Değişik araştırmacılar, muskovit - almandin - annit - sillimanit (MABS) barometresini kullanmışlardır (Spear ve Selverstone 1983; Robinson 1983; Holdaway 1988):

(38) almandin + muskovit = annit + sillimanit + kuvars



Amfibolit fasiyesindeki kayaların termobarometrik incelemeleri, bunların sıcaklık aralığının 500 - 700°C ve basınç aralığının ise 3 - 12 kbar basınç aralığında oluştuklarını göstermektedir.

**Granulit Fasiyesi**

Kantitatif termobarometre, granulit fasiyesinde, diğer fasiyeslerdekinden daha başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Granat, piroksen, feldispat ve olivin gibi susuz minerallerin granulit fasiyesinde yaygınlığı ve bu fazlar için belirli minerallerdeki izomorf karışım verilerinin kullanılabilirliği, katı çözeltiye sahip minerallerdeki uç üye bileşenlerinin aktiviteleri için düzeltmelerin yapılmasına da olanak tanımaktadır. Granulit fasiyesinde, başarılı bir şekilde kullanılan termometreler; manyetit - ilmenit termometresi (Buddington ve Lindsley 1964; Anderson ve Lindsley 1988), granat - klinopiroksen termometresi (Pattison ve Newton 1988), granat - ortopiroksen termometresi (Harley 1964b; Sen ve Bhattacharya 1984; Lee ve Ganguly 1988), iki feldispat termometresi (Sen ve Bhattacharya 1984; Harley 1984c, 1985; Anovitz ve Essene 1989; Haselton et al. 1983; Brown ve Parsons 1985) tir.

Barometre olarak (1), (2), (3) nolu reaksiyonlar ve aşağıdaki reaksiyonlar kullanılabilirler:

(39) ferrosilit = fayalit + kuvars

$Fe_2Si_2O_6 = FeSiO_4 + SiO_2$  (Bohlen ve Boettcher 1981),

(40) almandin + sillimanit = hersinit + kuvars

$Fe_3Al_2Si_3O_{12} + 5Al_2SiO_5 = 3FeAl_2O_4 + 5SiO_2$  (Bohlen ve diğ., 1986),

(41) almandin + korund = hersinit + sillimanit + kuvars

$Fe_3Al_2Si_3O_{12} + 5Al_2O_3 = 3FeAl_2O_4 + 3Al_2SiO_5$  (Bohlen ve diğ., 1986a),

(42) grossular + almandin = anortit + fayalit

$Ca_3Al_2Si_3O_{12} + 2Fe_3Al_2Si_3O_{12} = 3CaAl_2Si_2O_8 + 3Fe_2SiO_4$

(Bohlen ve diğ., 1986b-c),

(43) grossular + almandin + kuvars = anortit + ferrosilit

$Ca_3Al_2Si_3O_{12} + 2Fe_3Al_2Si_3O_{12} + 3SiO_2 = 3CaAl_2Si_2O_8 + 3Fe_2Si_2O_6$  (GASF, Bohlen ve diğ., 1986b-c),

(44) grossular + pirop + kuvars = anortit + enstatit

$Ca_3Al_2Si_3O_{12} + 2Mg_3Al_2Si_3O_{12} + 3SiO_2 = 3CaAl_2Si_2O_8 + 3Mg_2Si_2O_6$  (GAES, Newton ve Perkins

1982; Perkins ve Chipera 1985),

(45) grossular + pirop + kuvars = anortit + diyopsit

$2Ca_3Al_2Si_3O_{12} + Mg_3Al_2Si_3O_{12} + 3SiO_2 = 3CaAl_2Si_2O_8 + 3CaMgSi_2O_6$  (GADS, Newton ve Perkins 1982; Moecher ve diğ., 1988),

(46) grossular + almandin + kuvars = anortit + hedenberjit

$2Ca_3Al_2Si_3O_{12} + Fe_3Al_2Si_3O_{12} + 3SiO_2 = 3CaAl_2Si_2O_8 + 3CaFeSi_2O_6$  (GAHS, Moecher ve diğ., 1988),

(47) grossular + almandin + rutil = anortit + ilmenit + kuvars

$Ca_3Al_2Si_3O_{12} + 2Fe_3Al_2Si_3O_{12} + 6TiO_2 = 3CaAl_2Si_2O_8 + 6FeTiO_3 + 3SiO_2$  (GRIPS, Bohlen ve Liotta 1986),

(48) pirop + diyopsit + kuvars = enstatit + anortit

$Mg_3Al_2Si_3O_{12} + CaMgSi_2O_6 + SiO_2 = 2Mg_2Si_2O_6 + CaAl_2Si_2O_8$  (Paria ve diğ., 1988),

(49) almandin + hedenberjit + kuvars = ferrosilit + anortit

$Fe_3Al_2Si_3O_{12} + CaMgSi_2O_6 + SiO_2 = 2Fe_2Si_2O_6 + CaAl_2Si_2O_8$  (Paria ve diğ., 1988).

Birçok granulit fasiyesi bölgelerinde 700 veya 850°C sıcaklıklar için 6 - 8 kbar arasında basınçlar kaydedilirken (Perkins ve Newton 1981; Newton 1983; Bohlen ve diğ., 1983a-b-c; Bohlen 1987; Moecher ve diğ., 1988) bazen 10 - 12 kbar gibi yüksek basınçlara (O'Hara ve Yarwood 1978; Sanders ve diğ., 1987; Anovitz ve Essene 1989) veya bazen de 4 - 6 kbar gibi düşük basınçlara (Phillips, 1980; Schreurs ve Westra 1986; Anovitz ve Essene 1989) ve 900 - 1000°C lik sıcaklıklara (O'Hara ve Yarwood 1978; Ellis, 1980; Harley, 1987) ulaşılmıştır.

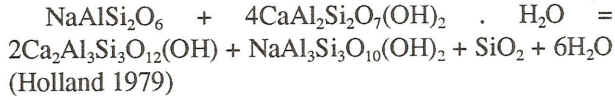
**Eklojit Fasiyesi**

Birçok araştırmacı tarafından eklojitlerin P-T koşulları konusunda araştırmalar yapılmıştır. Granulit, granat - granulit ve eklojit arasındaki geçişler değişik bazaltik bileşimler için yüksek sıcaklıklarda (1100 - 1200°C) meydana gelmektedir (Ringwood ve Green, 1964; Green ve Ringwood 1967, 1972; Ito ve Kennedy 1971). Amfibolitten granat amfibolite - eklojite kadar geçişler doğada nadir olarak görülmektedir, ancak, deneysel ola-



rak,  $P_{H_2O} = P_s$  için 675 - 700°C ve 15 - 25 kbar  $P'$  nin tam altında yer almaktadır (Essene ve diğ., 1970). Bazaltik bileşimdeki kayalar için eklojit mineralojisine geçiş büyük ölçüde  $P_{H_2O}$  ya bağlıdır. Disten, zoisit ve kuvars kabuksal eklojitlerde yaygın olmakla birlikte, çoğu eklojit toplulukları granat, klinopiroksen ve rutilde başka birkaç minerale daha sahiptirler. Manto nödüllerindeki (Sobolev ve diğ., 1976; Smyth ve Hatton 1977) ve kabuksal oluşumlardaki (Chopin 1984; Smith 1984) eklojitlerde nadir olarak koesit ( $SiO_2$ ' nin yüksek basınç modifikasyonu) görülmüştür. Amfiboller (glokofan, barroyisit, hornblend) ve mikalar (fenjit, paragonit, filogopit) eklojit örneklerinde görülmekle birlikte, bunların eklojitik topluluğunun bir bölümü olup olmadığı veya sonraki retrograd olaylarla oluşup oluşmadığı belirsizdir. Granat - klinopiroksen termometresi, eklojitler için uygulanabilir (Krogh 1988; Pattison ve Newton 1988; Essene 1982; Koons 1984). Ayrıca termometre için duraylı izotop çalışmaları da kullanılabilir (Matthews ve diğ., 1983; Robert ve diğ., 1985; Agrinier ve diğ., 1985). Barometrelerin çoğu, yüksek değişkenli toplulukları olduklarından dolayı eklojitlere uygulanamaz. Buna karşın (1), (3), (5), (40-49) nolu reaksiyonlar ve aşağıdaki reaksiyon kullanılabilir (Essene 1989):

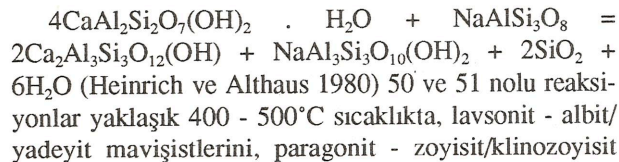
(50) yadeyit + lavsonit = zoyisit + paragonit + kuvars + su buharı



#### Mavişist Fasiyesi

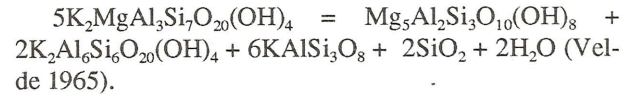
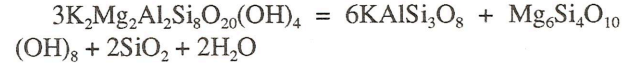
Birçok araştırmacı tarafından mavişist fasiyesi kayalarında jeotermobarometre çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Mavişist fasiyesi, ilksel olarak yadeyit, glokofan ve/veya lavsonit gibi yüksek basınç minerallerinin varlığı temelinde yeşilşist fasiyesinin yüksek basınç eşdeğeri olarak ayırtılabilir. Önemli mavişist fasiyesi denge reaksiyonları (19), (22), (23), (28) ve (50) nolu reaksiyonlarla aşağıdaki reaksiyonu kapsar:

(51) lavsonit + albit = zoyisit + paragonit + kuvars + su buharı

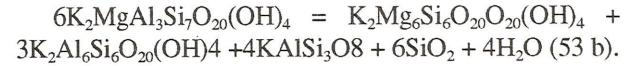
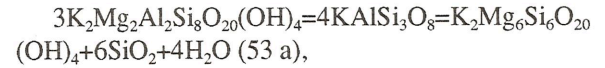


mavişistlerinden ayırır ve mavişist fasiyesi kayaları için kullanışlı termometreler oluşturur. Mavişistler için klorit - fenjit termometresi ve duraylı izotop jeokimyası verileri (Brown ve diğ., 1982) termometre olarak kullanılmaktadır (Essene 1989). Mavişistlere uygulanan termometreler fenjit içeren reaksiyonlardır:

(52) fenjit = K - feldspat + klorit + kuvars + su buharı

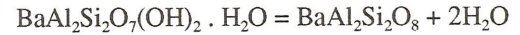


(53) fenjit = K - feldspat



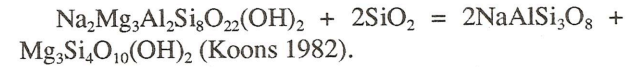
Diğer bir termometre de Sassi (1972) ve Sassi ve Scolari (1974)' ün, artan basınçların deneysel indeksi olarak fenjitin  $b_0$  hücre boyutunun belirlenmesi ilkesine dayanır. Nitsch (1980)'in deneyleri, smirit mineralinin (sulu Ba - Al silikat) mavişist fasiyesleri için gerçek bir mineral olduğunu ileri sürmekte ve smirit/selsian reaksiyonlarını kalibrasyon koşulları olarak ileri sürmektedir:

(54) smirit = selsian +  $H_2O$

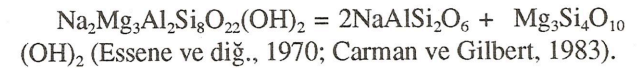


Glokofan dengesindeki uygulamalar aşağıdaki reaksiyonları kapsamaktadır. Ancak bunları termobarometre olarak kullanmak zordur (Essene 1989):

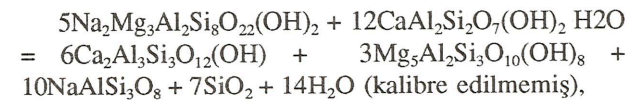
(55) glokofan + kuvars = albit + talk



(56) glokofan = yadeyit + talk

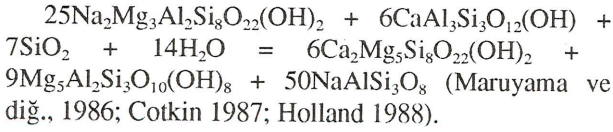


(57) glokofan + lavsonit = klinozoyisit + klorit + albit + kuvars + su buharı





(58) glokofan + klinoziyisit + kuvars + su buharı = tremolit + klorit + albit



Yapılan termobarometre çalışmalarının çoğu, mavişistlerin 250 - 450°C lik sıcaklık aralığında dengelendiğini göstermektedir. Basınçlar ise 5 - 12 kbar arasında değişir, hatta, bazen eklojit fasiyesine geçiş kayaçlarında 12 - 16 kbara kadar yükselir (Koons 1986). Bu sonuçlar, mavişist - eklojit fasiyesi sınırının 15 kbar yakınında olduğunu göstermektedir (Essene 1989).

### Kontakt Metamorfik Fasiyesleri

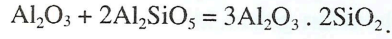
Birçok araştırmacı tarafından bu fasiyeslerde termobarometre çalışmaları yapılmıştır. Bu fasiyesler için kullanışlı jeotermometrelerin birçoğu termal olarak bölgesel metamorfik fasiyeslerdekiyle aynıdır (albit - epidot hornfels = yeşilşist; hornblend - hornfels = amfibolit; piroksen - hornfels veya sanidinit = granulit). Düşük sıcaklığa sahip kontakt metamorfiteerde kullanışlı termometreler kalsit - dolomit ve oksijen izotop sistemleridir. Dolomitte dengelenmiş kalsitteki  $\text{MgCO}_3$  içeriği 300 - 600°C arasında düzenlenir ve çoğunlukla orta sıcaklıklı kontakt metamorfik ortamlarda korunur (Essene 1983; Wada ve Suzuki 1983; Morikiyo 1984; Anovitz ve Essene 1987a).

Düşük dereceli kontakt metamorfiteer için kullanışlı olan kantitatif termobarometreler bulmak zordur. Ancak, bu tür kayaçlarda, dehidratasyon ve/veya dekarbonizasyon reaksiyonları termometre olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Essene 1989).

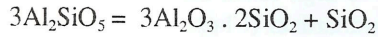
Diğer taraftan, yüksek sıcaklıklı kontakt metamorfiteer için ise kullanışlı olan termobarometreler bulunmaktadır. Ca - silikatlar ve Ca - Mg silikatları içeren sistemler, yüksek sıcaklıklı termal halelere uygun birçok termal duyarlı faz dengesi içerirler. (Winkler 1965; Turner 1968).  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  (Treiman ve Essene 1983) ve  $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO} - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  (Skippen 1974; Slaughter ve diğ., 1975; Egger ve Kerrick 1981; Sharp ve diğ., 1986) sistemlerindeki reaksiyonlar, karbonatlı kayaçlar için termometreler ve  $\text{CO}_2$  barometreleri oluşturur (Essene 1989). Granat - kuvars - plajiyoklaz - vollastonit mineral topluluğu piroksen - hornfels fasiyesinde yaygındır ve termobarometre olarak mükemmel

bir şekilde kullanılırlar. Sanidinit fasiyesinde metamorfizmaya uğramış pelitik kayaçlar, termobarometrik potansiyele sahip tek değişkenli iki reaksiyon içerirler.

(59) korund + sillimanit = mullit



(60) sillimanit = mullit + tridimit



Kontakt metamorfik kayaçlar 200 - 1000°C arasında değişen geniş bir sıcaklık aralığında oluşurlar. Çoğu kontakt haleler  $P < 2$  kbar da oluşur;  $P > 4$  - 5 kbarda ise bölgesel metamorfiteerden ayırtlanamazlar.

### BAZI ÖNEMLİ JEOTERMOBAROMETRE HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

Metamorfik kayaçlardaki çalışmanın ana amacı; orojenik kuşakları oluşturan karmaşık jeodinamik süreçleri açığa çıkartmaktır. Bu sonucu elde etmede önemli bir adım olan metamorfik kayaçların kantitatif termobarometresini hesaplamak için iki ana yaklaşım bulunmaktadır. Birinci yaklaşım, kayacın jeolojik geçmişte bir noktada dengelenmiş olduğu basınç ve sıcaklık koşullarının belirlenmesini amaçlayan konvansiyonel yöntemdir. Bu yöntem, kesin termobarometre olarak bilinir ve kayaçta etkin olan fiziksel koşulların kesin değerlerinin mümkün olduğunca doğru bir şekilde belirlenmesi ilkesine dayanır. İkinci yaklaşım ise, kayaçta hakim olmuş olan fiziksel koşullardaki değişimlerin belirlenmesi ilkesine dayanır. Bu yöntemde; referans olarak alınan basınç ve sıcaklık değerlerine göre hesaplanan P ve T değerleri kayaçtaki P-T evrim yolunu veya basınç - sıcaklık geçmişini açıklamaya çalışır. Bu yaklaşım, görelî termobarometre olarak bilinir ve bu yöntemde P ve T değerleri kesin değerlerin üzerinde olabilir.

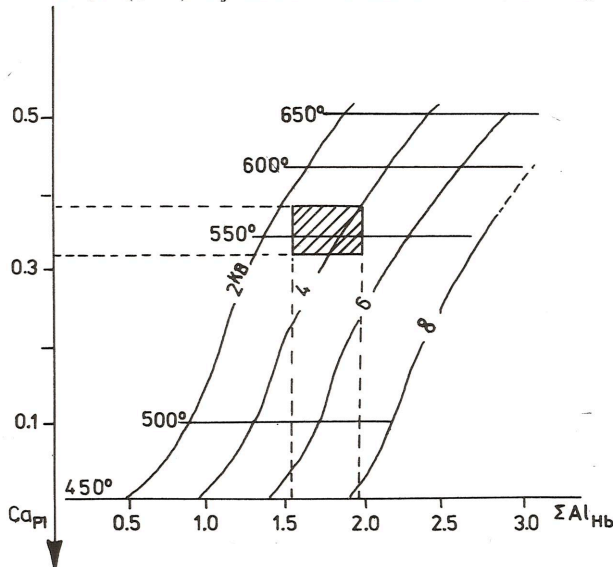
Görelî ve kesin termobarometre arasındaki en önemli fark; herbirinden elde edilen bilginin tipidir. Kesin termobarometrenin uygulanmasından elde edilen sonuçlar; bir kayaç veya kayaç grubunun kristalleşme tarihçesindeki bir noktada dengelenmiş olduğu basınç ve sıcaklık koşullarıdır. Bu sonuçlar, dengelenme sırasındaki kabuğun termal yapısı ve derinliğini ortaya çıkarmada kullanılabilir. Görelî termobarometre, T ve P veya bir P-T evrim yolunun hesaplanmasını kapsar. Burada, kabuğun zaman içerisindeki evrimi hakkında bilgiler elde edilebilir. Jeotermobarometrenin her iki tipi de, analitik hatalar, kalibrasyon hataları ve termodina-



mik veri ve çözüm modellerindeki hatalarla etkilenen belirsizliklere sahiptir. Birçok termobarometre, hesaplanan sıcaklıklarda  $\pm 25 - 50^\circ\text{C}$  ve basınçlarda ise  $\pm 0.5 - 2$  kbar'lık hatalara veya  $\pm 5 - 10\%$  luk hatalara sahiptir.

### Plajiyoklaz - Hornblend Jeotermobarometresi

Amfiboller, metamorfik koşulların geniş aralıkları içerisinde, sıcaklık ve basıncın iyi bir indikatörü olarak bilinmektedir. Perchuk (1970), jeotermometre olarak birlikte oluşan plajiyoklaz ve amfibollerdeki Ca:Na oranının kullanılabilirliğini ileri sürmüştür. Bilindiği gibi, metamorfizma derecesinin artmasıyla Ca - amfibollerdeki Al içeriği de artmaktadır (Leake, 1962; Kostyuk, 1970; Hietanen, 1974; Graham, 1974). Plyusnina (1982) tarafından geliştirilen plajiyoklaz - hornblend jeotermobarometresinde, sıcaklığa bağlı olarak plajiyoklazlardaki Ca/Ca+Na oranındaki değişim ve basınç - sıcaklık değişimi ile de Ca - amfibollerdeki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeriğinin değişimi deneysel olarak belirlenerek jeotermobarometre olarak kullanılmaktadır. Plajiyoklazlardaki An içeriği düşey eksene, Ca - amfibollerdeki Al içeriği yatay eksene yerleştirilir (Şekil 1). İzobarlar, P ve T'nin her ikisine bağlı olarak Ca - amfibollerdeki Al içeriğine göre, izotermeler ise plajiyoklazlardaki An içeriğine göre işaretlenmiştir. Sonuçta birlikte oluşan Ca - amfiboller ve plajiyoklaz bileşimlerinin işaretlenmesi, onların denge P-T koşullarını belirtir. Bu jeotermobarometre metodunda, P (kbar) ölçümünde  $\pm 1$  kbarlık ve T ( $^\circ\text{C}$ ) hesapla-

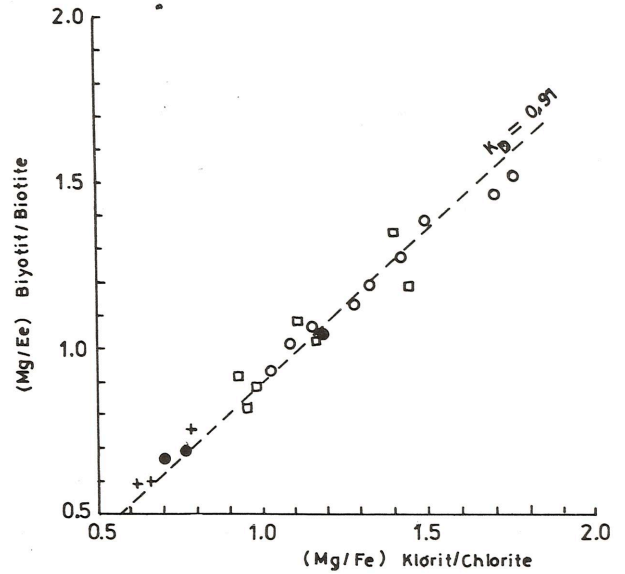


Şekil 1. Plajiyoklazlardaki  $\Sigma\text{Ca}$  ve hornblendlerdeki  $\Sigma\text{Al}$  içeriği ile basınç-sıcaklık arasındaki ilişkiyi gösteren diyagram [Plyusnina, (1982) den alınmıştır].

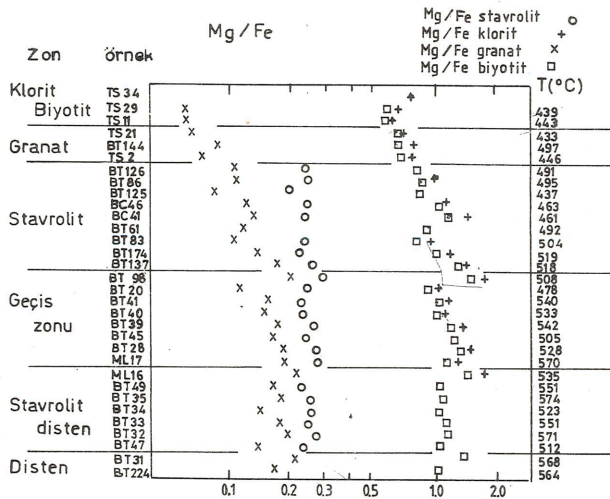
masında ise  $\pm 10 - 15^\circ\text{C}$  lik bir standart sapma söz konusudur.

### Metapelitlerde Jeotermobarometre ve Sıcaklık - Bileşim T-X (Fe-Mg) İlişkileri

Birlikte oluşan fazlar arasındaki elementlerin sistematik paylaşılması ve distribüsyon (dağılım) katsayılarındaki sistematik değişimlerin incelenmesi, ulaşılan metamorfizma derecesi hakkında genel bir fikir verebilir. Şekil 2'de gösterilen klorit ve biyotit arasındaki Fe ve Mg paylaşımına bakıldığında, dağılım katsayısının ( $\text{KD} = (\text{Mg/Fe})_{\text{Bi}} / (\text{Mg/Fe})_{\text{Chl}} = 0.91$ , olduğu ve örneklenen aralıkta metamorfizma derecesine bağımlı olmadığı görülmektedir. Diğer yandan, granat kenar zonu ile biyotit ve granat kenar zonu ile stavrolit arasındaki Fe-Mg paylaşımı, metamorfizma derecesine sistematik bağımlılık göstermektedir. Şekil 3, analiz edilen örneklerdeki ferromagnezyan mineraller arasındaki Fe ve Mg un dağılımını özetlemektedir. Bütün fazlar, metamorfizma derecesinin artmasıyla daha magnezyumlu bileşime sahip olmaktadır. Buna karşın, metamorfik akışkanın bileşimindeki yersel değişikliklere bağlı olarak metamorfik derecenin ileri evrelerinde bazen demirce zengin bileşimler de gözlemlenmektedir (Lang ve Rice, 1985). Uygun reaksiyonlar için deneysel düzenlemeler ve termokimyasal veri kullanıldığında, analiz edilen mi-



Şekil 2. Birlikte oluşan klorit ve biyotitteki Fe/Mg oranlarını karşılaştıran diyagram. Semboller, farklı zonlardaki mineral çiftleri için kullanılmıştır: klorit-biyotit zonu (+); granat zonu (siyah daire); stavrolit zonu (içi boş kare); geçiş zonu (içi boş daire) (Lang and Rice, 1985).



Şekil 3. Artan metamorfizma derecesine göre, örneklerdeki Mg/Fe oranının logaritmik ölçekte işaretlenmesi (Lang and Rice, 1985 ten alınmıştır).

neral topluluklarının denge koşullarını tahmin etmek olasıdır. Aşağıdaki hesaplamalarda, gazların standart hali ilgili sıcaklıkta ve 1 bar basınçtaki ideal gazdır; katı fazlar için, ilgili sıcaklık ve basınçta saf uç üye mineral bileşendir. İlgili fazlar için termodinamik veriler Çizelge 1'de toplu olarak verilmiştir.  $\ln K = A/T + B + C(P-1)$  T şeklinde ifade edilen denge sabitleri Çizelge 2'de görülmektedir. Çizelge 3 ise katı çözeltiler için aktivite modellerini tanımlamaktadır. Doğal mineral bileşimlerinden itibaren sıcaklığın hesaplanmasında deneysel kalibrasyonun kullanılması için Çizelge 4'te verilen aktivite - bileşim ilişkileri kullanılmaktadır.

Fe - Mg granat ve biyotit katı çözeltileri arasındaki Fe - Mg değişimi ilişkisi Ferry ve Spear (1978) tarafından incelenmiştir. Bu ilişkiler termometre hesaplamalarının temelini oluşturmaktadır (Çizelge 3). Pelitik bileşimli kayalarda, alüminyum silikat içeren ve içermeyen kayalardaki termobarometre hesaplamalarının yapılabilmesi için literatürde ayrıntıları verilen bazı deneysel kalibrasyonların yapılması gerekmektedir.

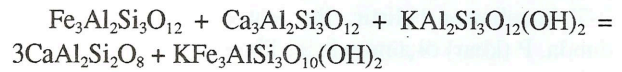
Örnek olarak, alüminyum silikatlardan yalnızca distenin bulunduğu topluluklarda jeobarometre hesaplamalarına bakıldığında distenin katıldığı aşağıdaki reaksiyonlar ve bunlarla ilişkili deneysel kalibrasyonlar kullanılmaktadır. Distenin varlığı durumunda, var olan metamorfik koşulların disten - andaluzit ve disten - sillimanit sınırının üzerinde olduğu bilinmektedir. Böylesi bir durumda üst basınç limiti granat, ilmenit, disten ve

kuvars topluluğunun yardımıyla belirlenebilmektedir. Granatın bileşimine bağlı olan bu limit almandin + 3rutil = 3ilmenit + disten + kuvars dengesinde gidilerek hesaplanmaktadır. Deneysel verilerden elde edilen  $\ln K$ , Çizelge 2'de verilen (3b) için, (2) nolu dengeyle ilişkilidir. (3b) dengesi, analiz edilen granatlardaki almandinin indirgen aktivitesiyle düşük basınca doğru yer değiştirir.

Granat, plajiyoklaz, disten ve kuvars topluluğu içeren kayalar için toplam basıncın doğrudan hesaplanması

3 anortit = grossular + 2 disten + kuvars dengesine göre yapılabilir. Bu jeobarometre Ghent (1976) tarafından önerilmiş ve Newton ve Haselton (1981) tarafından yeniden düzenlenmiştir. Newton ve Haselton (1981) tarafından ileri sürülen formülleme ve aktivite modellerinde Mn - bağımlı bazı parametreler kullanılmaktadır (Hodges ve Spear, 1982). Anortit parçalanma reaksiyonlarının deneysel çalışmalarından (Hays, 1966; Hariya ve Kennedy, 1968; Goldsmith, 1980) uç üye dengesi için bir P-T eşitliği türetilmiştir:  $P = 711.9 + 22.77 T$  (bar, K)

Plajiyoklaz - granat - muskovit - biyotit topluluğu ise aşağıdaki denge reaksiyonuyla ilişkilidir:



Bu denge, basınca duyarlı ve  $f_{H_2O}$  ya bağımlı değildir (Lang ve Rice, 1985). Alüminyum silikatlardan yoksun olan topluluklara uygulanan bu dengeyi, bir jeobarometre olarak kullanmak için bazı deneysel düzenlemeler yapılmaktadır (Ghent ve Stout, 1981; Hodges ve Crowley, 1985).

#### Granat - muskovit - biyotit - plajiyoklaz - Al - silikat termobarometresi

Granat - muskovit - biyotit - plajiyoklaz minerallerinin bileşimlerinin belirlenmesiyle aşağıda verilen değerlerin hesaplanması ve formüllerde yerine konulmasıyla, metamorfizma basınç ve sıcaklık koşulları belirlenebilmektedir. Bu yöntemde, değişik jeotermometre ve jeobarometre hesaplamaları olmasına karşın, burada jeotermometre hesaplamaları Ferry ve Spear (1978), Ghent ve Stout (1981) ve Newton ve Haselton (1981) tarafından önerilen eşitliklerle yapılmaktadır. Ferry ve Spear (1978):



## Jeotermobarometre

Çizelge 1. Seçilen fazlar için termodinamik veri (Lang ve Rice, 1985' ten)

Faz	Cp			Vs	$\Delta G_f^0$	$\Delta H_f^0$	$S^0_{298K}$	T
	a	bX10 <sup>3</sup>	cX10 <sup>-5</sup>					
	J mol <sup>-1</sup>	J mol <sup>-1</sup> K <sup>-2</sup>	J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	J bar <sup>-1</sup>	J mol <sup>-1</sup>	Jmol <sup>-1</sup>	J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	K
$\alpha$ -kuvars	46.94a	34.309a	-11.297a	2.2688a (2.324)	-856239a	-910648a	41.338a	848
$\beta$ -kuvars	60.29a	8.117a	0a	2.372				
rutil	62.861c	11.358c	-9.9886c	1.8820d	-889446d	-944750d	50.29d	
ilmenit	138.49c	3.8835c	-64.1485c	3.1690d	-1159170d	-1236622d	105.86d	
silliman.	167.46a	30.922a	-48.884a	4.990a	-2427101a	-2573574a	96.776a	
disten	173.189a	28.520a	-53.899a	4.409a	-2430720a	-2581097a	83.68a	
almandin								
<848	408.15a	140.75a	-78.37a	11.528a	-4941125e	-5277200e	298.7b	
>848	448.06a	62.17a	-44.48a					
grossular	435.207a	71.182a	-114.299a	12.53a			254.7a	
pirop				11.370d				
Fe-stav.	1733.8f	335.2f	-469.4f	44.88a	-22240858f	-	885.0i	
						23748945f		
							998.94f	
Mg-stav.				44.307h				
Anortit	264.893a	61.898a	-64.601a	10.079a			205.4a	
albit(low)	258.2a	58.16a	-62.80a	10.007a	-3708313a	-3931621a	207.2a	623
(high)	258.2a	58.16a	62.80a	10.043a	-3700786a	-3920617a	218.8a	
Fe-biyotit	445.30a	124.6a	-80.79a	15.432a	-4799701a	-5155504a	398.3a	
Mg-biyot.	420.95a	120.4a	-89.96a	14.966a	-5841646a	-6226072a	318.4a	
Mg-klorit	671.53j	176.2a	-156.8a	20.711a	-8207765a	-8857377a	465.3a	
				21.1g	-8283000a	-8958489a	380.0a	
Fe-klorit	712.12j	183.1a	-145.5a	21.342a			595.7a	
Muskovit	408.19a	110.37a	-106.44a	14.071a	-5591083a	-5972275a	287.9a	
paragonit	407.6a	102.5a	-110.6a	13.253a	-5548034a	-5928573a	277.8a	
kalsit	104.52a	21.92a	-25.97a	3.6934a			92.68a	
zoisit	444.00a	105.50a	-113.57a	13.59a			295.98a	
grafit	16.86a	4.77a	-8.57a	0.52982a	0	0	5.7405a	
H2O	30.54a	10.29a	0	-	-228589a	-241818a	188.72a	
O2(g)	29.96a	4.18a	-1.67a	-	0	0	205.029a	
CO2(g)	44.22a	8.79a	8.62a	-	-394392a	-393522a	213.685a	
H2(g)	27.28a	3.26a	0.50a	-	0	0	130.54a	
CH4	23.64a	47.86a	-1.92a	-	-50739a	-74810a	186.155a	

$$C_p = a + bT + cT^{-2}$$

a- Hegleson ve diğ., 1978

b- Hegleson ve diğ., 1978' den hesaplanan

c- Robie ve diğ., 1978

d- Robie ve diğ., 1978

e- Lang ve Rice, 1985

f- toplamdan hesaplanan

g- Lang ve Rice, 1985

h- Griffin ve Robie, 1973

i- Lang ve Rice, 1985

j- Toplamdan hesaplanan Cp

## Jeotermobarometre

Çizelge 2. Metaperlitlerde gözlenen reaksiyonlar için denge sabitleri (Lang ve Rice, 1985)

Denge no	Denge	A	B	C	Kaynak
(1)	1/3Alm+1/3Mg-Biyo=1/3pirop+1/3Fe-biyo	-2089.04	0.782	-0.00956	a
(2)	Disten=sillimanit	-742.33	1.3034	-0.07045	b
(3a)	Almandin+3Rutil=3ilmenit+sillimanit+2kuvars	488.14	2.2381	-0.2346	c
(3b)	almandin+3rutil=3ilmenit+disten+2kuvars	1230.47	0.9347	-0.1672	c
(4)	3anortit=grossular+2disten+a-kuvars	5663.57	-18.1318	0.79624	c
(5)	almandin+grossular+muskovit=3anortit+Fe-biyo.	-8747.0	19.98	2.414-Vgr/R	d
(6)	paragonit+a-kuvars=albit+disten+H2O	-9383	18.01	0.1348	b
(7*)	1/2Fe-stav.+12.5kuvars=2/3alman.+23/6dist.+H2O	-13456.8	20.379	0.32414	c
(7**)		-7668.0	14.915	0.32414	c
(8)	C(grafit)+O2=CO2	47456	0.1193	0.06372	b
(9)	CO+1/2O2=CO2	34052	10.472		b,e
(10)	H2+1/2O2=H2O	29627	6.4238		b
(11)	CH4+2O2=CO2+2H2O	96175	0.1401		b
(12)	almandin+muskovit=Fe-biyo+2dist+kuvars	-2339.01	2.1317	-0.1173	b,c
(13)	3anort.+kalsit+H2O=2zoisit+CO2	8132.5	-14.14	0.8119	c
(14*)	3Fe-klor.+5musk.=5Fe-biyo.+8dist.+kuv.+12H2O	-128687	224.37	2.5011	b
(14**)		-92370	193.62	2.5011	b,c
(15)	Mg-klor.=fonsterit+enstatit+spinel+H2O				
(16)	Mg-klor.+dolomit=spinel+forst.+kalsit+H2O+CO2				
(17)	Mg-klor.+musk.=Mg-biyo.+disten+kuvars+H2O				
(18)	1/5Mg-klor.+1/3Fe-biyo.=1/5Fe-klor.+1/3Mg-biyo.	-20.88	-0.0953	0.00348	f
(19)	1/5Mg-gran+1/4Fe-stav.=1/3Fe-gran.+1/4Mg-stav.	1787.8	-1.8627	0.00917	f

$$\ln K_n = (A_n/T) + B_n(C_n(P-1)/T) \text{ (bar, K)}$$

a: Ferry ve Spear, 1978

b: Hegleson ve diğ., 1978

c: Lang ve Rice, 1985

d: Hodges ve Crowley, 1985

e: Robie ve diğ., 1978

f: Lang ve Rice, 1985

$$3RT \ln K_1 = 12.454 - 4.662T(^{\circ}K) + 0.057P(\text{bar}) + \frac{3RT \ln K}{[Mg/Fe(\text{gr})]/[Mg/Fe(\text{bi})]}$$

$$K_1 = \frac{(X_{\text{pyr}})^3 (X_{\text{ann}})^3}{(X_{\text{phl}})^3 (X_{\text{alm}})^3}$$

$$X_{\text{phl}} = Mg / (Al_{\text{VI}} + Ti + Fe + Mn + Mg) \quad X_{\text{ann}} = Fe / (Fe + Mg)$$

$$X_{\text{pyr}} = Mg / (Fe + Mg + Mn + Ca) \quad X_{\text{alm}} = Fe / (Fe + Mg + Mn + Ca)$$

$$T(^{\circ}K) = \frac{2089 + 0.00956 P(\text{bar})}{0.780 - \ln K^*}$$

Newton ve Haselton (1981):

$$T(^{\circ}K) = \frac{[1661 - 0.755T(K)] X_{\text{gr}}(\text{Ca}) + 2089 + 0.00956P(\text{bar})}{0.7820 - \ln K^*}$$

$$\text{Ganguly ve Saxena (1984) } T(^{\circ}K) =$$

$$\frac{W + FeMg[(X_{\text{Fe}} - X_{\text{Mg}}) - 0.8/R + 1510X_{\text{CaGr}} + 2089 + 0.00956P(\text{bar})]}{0.7820 - \ln K^*}$$

$$\ln K^* = \frac{X_{\text{Mg}}}{X_{\text{Fe}}} \frac{Gr^* X_{\text{Fe}}^{Bi}}{Gr^* X_{\text{Mg}}^{Bi}} = \ln \frac{(Mg/Fe)_{\text{Gr}}}{(Mg/Fe)_{\text{Bi}}}$$

Jeobarometre hesaplaması (Newton ve Haselton, 1981):

$$P = \frac{P_0 - RT \ln K}{V_A(\text{dis})}$$

$$P_0 = -1.17 + 0.0238 T(^{\circ}C)$$

Jeobarometre hesaplaması (Ghent ve Stout, 1981):

$$-1.802 P = 4124.4 - 22.061 T + RT \ln K_4$$



Çizelge 3. Katı çözeltiler için aktivite / bileşim modelleri

Bileşen	aktivite modeli	kaynak
Almandin	$a_{alm} = (\gamma_{alm} X_{Fe}^{gra})^3; X_{Fe}^{gra} = Fe/(Fe+Mg+Mn+Ca)$ $\gamma_{alm} = \exp\{(1/RT) * (-W_{CaMg} X_{Mg} X_{Ca})\}$ $W_{CaMg} = 13807 - 6.3T$ (joule, K) (bütün diğer W değerleri yaklaşık 0 dir)	Newton ve Haselton (1981)
Pirop/Almandin	$a_{pir}/a_{alm} = (X_{Mg}^{gra} \gamma_{pir})^3 / (X_{Fe}^{gra} \gamma_{alm})^3$ (1) $\gamma_{pir} = \gamma_{alm} = 1.0$ (2) $(\gamma_{pir}/\gamma_{alm}) = \exp\{(1/RT) * (W_{FeMg}(X_{Fe}-X_{Mg}) + W_{Ca}X_{Ca} + W_{Mn}X_{Mn})\}$ $W_{Ca} = W_{CaMg} - W_{CaFe} = 12.55 \text{ kJ}$ $W_{Mn} = W_{MgMn} - W_{FeMn} = 12.55 \text{ kJ}$ $W_{FeMg} = 8.375 \text{ Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}) + 10.46 \text{ Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg}) \text{ kJ}$ (3) $\gamma_{pir}/\gamma_{alm} = \exp(1/RT) * (W_{CaMg} X_{Ca}^{gra})$ $W_{CaMg} = 13807 - 6.3T$ (joule)	ideal Ganguly ve Saxena (1984)
Fe-biyotit Mg-biyo Grossular	$a_{Fe-biyo} = (X_{Fe}^{biyo})^3; X_{Fe} = Fe/(Fe+Mg+Mn)$ $a_{Mg-biyo} = X_{Mg}^{biyo}$ $a_{gro} = \gamma_{gro} X_{Ca}^{gra}$ $\gamma_{gro} = \exp\{[W_{CaMg} * (X_{Mg}^2 + X_{Mg} X_{Fe})]/RT\}$ $W_{CaMg} = 13807 - 6.3T$ (joule)	ideal Newton ve Haselton (1981) Hodges ve Spear (1982)
Anortit	$a_{an} = \{[X_{Ca}^{Pl} (1 + X_{Ca}^{Pl})^2]/4\} \exp\{[(1 - X_{Ca})^2]/T * (1032 + 4726 X_{Ca})\}$ $X_{Ca}^{Pl} = Ca/(Ca+Na+K)$	Newton ve Haselton (1981)
Albit Paragonit	$a_{alb} = X_{Na}^{Pl}; \tau_{alb} = 1.0$ $a_{pa} = \gamma_{pa} X_{Na}^{mus} (X_{Al}^{vi})^2 X_{OH}^2$ (1) $\gamma_{pa} = \exp\{(1/RT) * [X_{mus}^2 (W_{pa} + 2(W_{mus} - W_{pa}) X_{pa})]\}$ $X_{pa} = X_{Na}^{mus} = Na/(Na+K); X_{mus} = 1 - X_{pa}$ (2) $\gamma_{pa} = \exp\{(1/RT) * [X_{mus}^2 W_{pa} (1 - 2X_{pa}) + 2W_{mus} X_{pa} X_{mus} (1 - X_{pa}) - 2X_{Na}^{Kcel} X_{Kcel} (W_{mus} X_{Na}^{Kcel} + W_{pa} X_{Kcel})]\}$ $X_{pa} = X_{Na}^{mus} (1 - X_{mus}^{FeMg}); X_{mus}^{FeMg} = Fe+Mg/Top(Al^{vi})$ (1982) $X_{mus} = (1 - X_{Na}^{mus}) (1 - X_{mus}^{MgFe})$ $X_{Na}^{Kcel} = X_{Na}^{mus} (X_{mus}^{MgFe})$ $X_{Kcel}^{mus} = (1 - X_{Na}^{mus}) (X_{mus}^{FeMg})$ $W_{pa} = 12957 + 0.3138P + 0.710T$ (joule, bar, K) $W_{mus} = 18016 + 0.2389P + 1.6543T$ (joule, bar, K)	Pigage ve Greenwood (1982) Pigage ve Greenwood (1982)
Fe-stavrolit	$a_{sta} = X_{Fe}^{sta} = [Fe/(Fe+Mg+Mn+Zn)]^4$	ideal
Zoisit	$a_{zo} = X_{zo}$ $X_{zo} = (Al^{VI} - 2) / [(Al^{VI} - 2) + Fe^{3+} + Mn + Mg]$	ideal

Çizelge 4. Amfibolit örneğindeki hornblend ve plajiyoklazlar dan elde edilen EMA analiz sonuçları ve katyon değerler (Örnek no: MA-472)

Hornblendler/Hornblendes									
Oksit Oxide	1	2	4	6	7	9	12	13	
K <sub>2</sub> O	0.77	1.09	0.95	0.80	1.23	0.82	1.32	1.06	
NiO	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.08	0.04	0.00	
Na <sub>2</sub> O	1.50	1.80	1.67	1.50	1.85	1.56	1.72	1.77	
CaO	11.53	11.87	11.79	11.83	11.62	11.51	11.59	11.71	
FeO	14.50	16.42	15.05	16.29	16.28	15.69	16.39	16.32	
MgO	12.45	11.18	12.02	12.55	11.00	11.89	11.19	11.18	
TiO <sub>2</sub>	0.65	1.10	0.68	0.64	0.94	0.58	0.66	0.72	
MnO	0.39	0.42	0.35	0.29	0.28	0.20	0.29	0.18	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.08	10.82	9.73	9.35	11.20	9.84	10.18	11.05	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.08	0.01	0.00	0.00	0.11	0.00	0.11	
SiO <sub>2</sub>	43.97	42.21	43.05	44.15	42.02	43.53	41.91	42.49	
H <sub>2</sub> O	1.96	1.97	1.95	1.99	1.96	1.97	1.93	1.97	
Toplam	96.82	98.95	97.39	99.38	99.38	97.77	97.22	98.56	
Katyonlar/Cations									
K	0.15	0.21	0.18	0.15	0.24	0.16	0.26	0.20	
Ni	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
Na	0.44	0.52	0.49	0.43	0.54	0.45	0.51	0.52	
Ca	1.89	1.93	1.93	1.90	1.90	1.87	1.92	1.90	
Fe	1.85	2.08	1.92	2.04	2.07	1.99	2.12	2.07	
Mg	2.83	2.53	2.74	2.81	2.50	2.70	2.58	2.53	
Ti	0.07	0.12	0.07	0.07	0.10	0.06	0.07	0.08	
Mn	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	
Al	1.63	1.94	1.75	1.65	2.01	1.76	1.85	1.99	
Si	6.72	6.42	6.59	6.63	6.42	6.63	6.49	6.46	
OH	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
Top.	16.67	16.84	16.78	16.75	16.85	16.71	16.88	16.81	
Plajiyoklazlar/Plagioclases									
Oksit/oxide	3	5	10	11	Katyon Cation				
K <sub>2</sub> O	0.31	0.29	0.33	0.39	K	0.018	0.017	0.019	0.022
Na <sub>2</sub> O	6.91	6.64	7.11	7.22	Na	0.61	0.58	0.62	0.64
CaO	7.39	7.77	7.46	6.81	Ca	0.36	0.38	0.36	0.33
FeO	0.27	0.08	0.10	0.18	Fe	0.010	0.003	0.003	0.006
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.26	26.01	25.37	24.41	Al	1.36	1.39	1.36	1.32
SiO <sub>2</sub>	57.08	57.02	57.67	57.92	Si	2.62	2.60	2.62	2.66
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.08	0.10	0.11	Cr	0.001	0.003	0.003	0.003
Top.	97.36	98.08	98.18	97.16	Top.	5.00	4.99	5.01	5.00

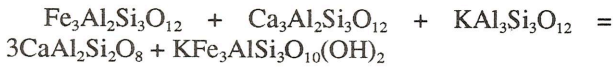
$$\ln K_4 = \frac{(X_{an})^3 (X_{ann})^3}{(X_{ms}) (X_{gr})^3 (X_{alm})^3}$$

$$X_{ms} = Al^{VI} / (Al^{VI} + Ti + Fe + Mn + Mg), X_{gr} = Ca / (Fe + Mg + Mn + Ca),$$

$$X_{an} = Ca / (Ca + Na + K)$$

#### Granat - muskovit - biyotit - plajiyoklaz jeotermobarometresi yöntemi

Birlikte oluşan granat - muskovit - plajiyoklaz - biyotit topluluğu aşağıdaki dengeyle ilişkilidir:



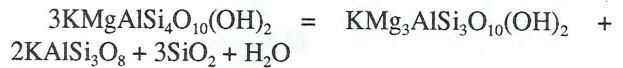
Bu denge basınca duyarlı ve fH<sub>2</sub>O dan bağımsızdır (Lang ve Rice, 1985). Bu denge, aynı zamanda, alüminyum silikat polimorflarından yoksun topluluklara uygulanır (Ghent ve Stout, 1981; Hodges ve Crowley, 1985). Bu durumda, yukarıda belirtilen topluluktaki minerallerin kimyasal bileşimlerinden gidilerek basınç ve sıcaklık hesaplamaları yapılabilir.

Bu yöntemde jeotermobarometre hesaplamaları için Ferry ve Spear (1978) hesaplama yöntemi ve jeobarometre hesaplamaları için ise Ghent ve Stout (1981) hesaplama yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, toplulukta alüminyum silikat polimorfu bulunmadığı için Newton ve Haselton (1981) yöntemi kullanılmamaktadır.

#### Biyotit - muskovit - klorit - kuvars

#### jeotermobarometresi

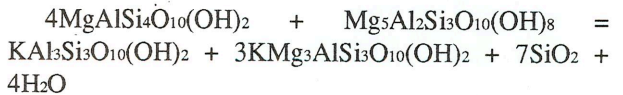
Bilindiği gibi fillosilikatlarda oktaedrik ve tetraedrik boşluklar belli katyonlar tarafından doldurulmaktadır. Bu boşlukları Al elementinin doldurması ise metamorfizma açısından bazı önemli ipuçları verebilmektedir. Oktaedrik boşluklarında alüminyum içeren mineraller, tetraedrik boşluklarında alüminyum içeren minerallerden daha yüksek basınçlarda duraylı olmaya eğilimlidirler. Muskovitin uç üyesi olan Mg-Al seladonit (KMgAlSi<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>) hiçbir tetraedrik alüminyum içermemektedir. Dolayısıyla seladonit uç üyesi, yüksek basınçlarda, muskovitte daha önemli miktarlarda bulunacaktır. Bu karşılaştırma, seladonitin jeobarometre olarak kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır. Seladonit hakkındaki termodinamik verilerle (Velde, 1965) kuvars, alkali feldispat (ortoklaz), muskovit (muskovit ve seladonit uç üyeleri), biyotit (filopit uç üyesi) ve klorit (klinoklor uç üyesi) minerallerini içeren reaksiyonlardan gidilerek jeobarometrik hesaplamalar yapılabilir. Bu reaksiyonlardan jeobarometre hesaplamalarında kullanılan en önemli iki reaksiyon şunlardır:



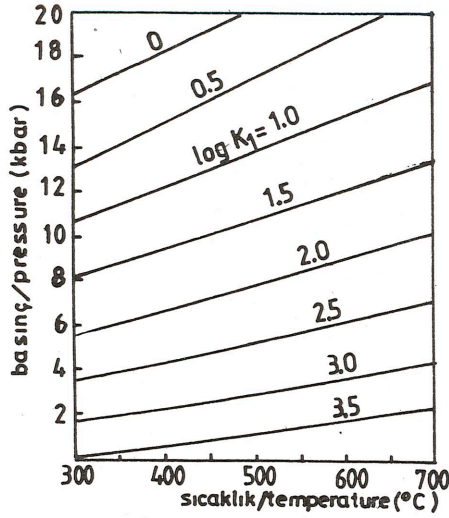
Bu reaksiyonun K1 denge sabiti minerallerin aktivitelerinden gidilerek aşağıdaki biçimde hesaplanmaktadır. İdeal durumlarda a (aktivite) değerleri X (bileşim) değerlerine eşittir.

$$\log K1 = \log a_{cel} + \log a_{phl} + 2 \log a_{kfs} + 2 \log a_{H_2O} + 3 \log a_{qtz}$$

Burada hesaplanan değerler Şekil 4'e aktarıldığında metamorfizma basınç ve sıcaklık değerleri bulunabilmektedir (Nurmien, 1987).







Şekil 4. Klorit ve muskovitin bulunmadığı denge 1 için denge sabiti konturları (Nurminen, 1987).

Bu reaksiyonun denge sabiti ise

$$\ln K = \frac{X_{\text{mus}} \cdot X_{\text{phl}} \cdot P^3}{X_{\text{cel}}^4 \cdot X_{\text{clin}}}$$

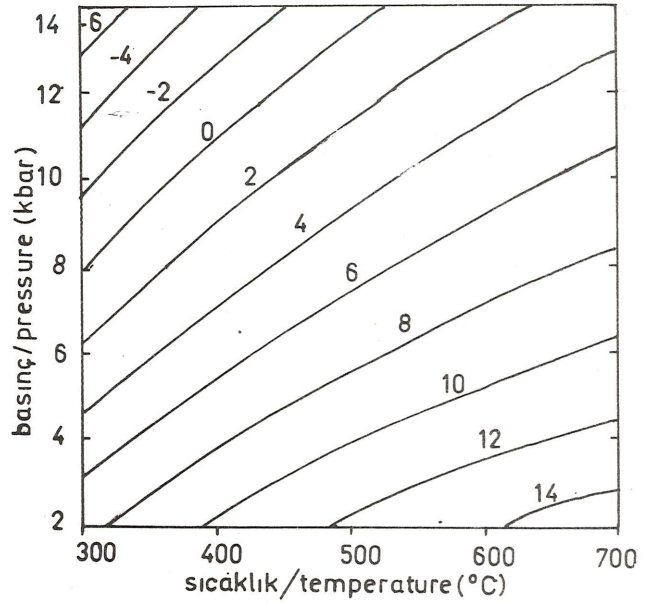
Kayaçta belirlenen biyotit, muskovit ve klorit minerallerinin kimyasal bileşimlerinden gidilerek elde edilen lnK değerleri Şekil 5' deki diyagrama aktarılarak bu reaksiyonun gerçekleştiği basınç ve sıcaklık koşulları hakkında bilgi edinilmektedir (Powell ve Evans, 1983). Aynı reaksiyon için Nurminen (1987) tarafından hesaplanan logK<sub>(kfs)</sub> değerleri için P-T diyagramı Şekil 6' da görülmektedir.

$$\log K(kfs) = -\log a_{\text{chl}} - 4\log a_{\text{cel}} + 7\log a_{\text{qtz}} + \log a_{\text{mus}} + 3\log a_{\text{phl}} + 4\log a_{\text{H}_2\text{O}}$$

#### Fenjit jeotermobarometresi

Fenjit, bilindiği gibi muskovit - seladonit katı çözelti serisingin orta üyesidir ve kimyasal bileşimi;

$(\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2 - \text{K}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2)$  şeklindedir. Bu mineralin P-T duraylılıkları hakkındaki deneysel gözlemler Velde (1965) tarafından yapılmıştır. Crowley ve Roy (1964), yaptıkları deneysel çalışmalarda K<sub>2</sub>O - MgO - A<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O (KMASH) sisteminde ideal muskovitten fenjite kadar bir karışabilirlik aralığı tanımlamışlardır. Yaklaşık

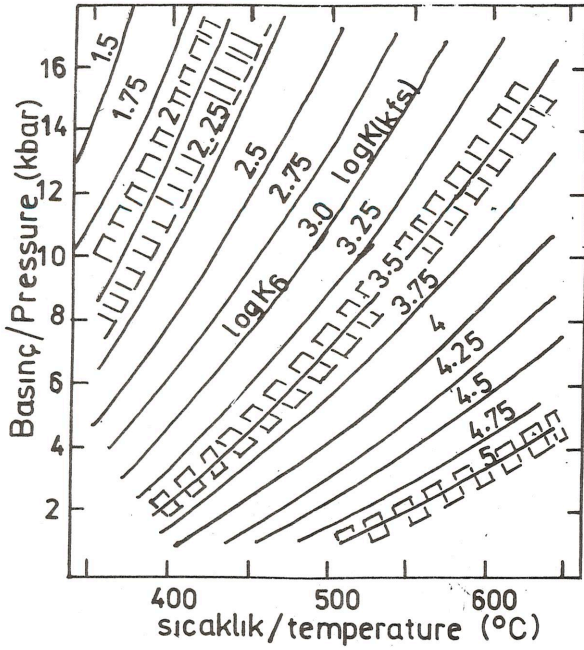


Şekil 5. (2) nolu dengenin lnK değeri için konturlanmış basınç-sıcaklık diyagramı.

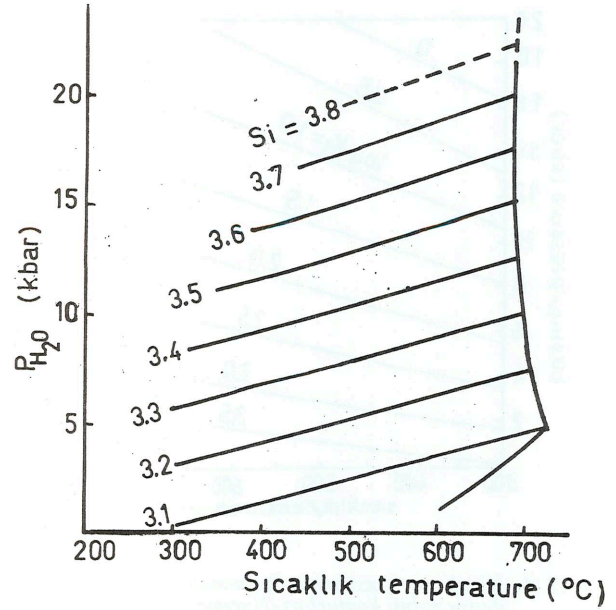
400°C ye kadar değişen sıcaklık ve 4 kbar gibi uygulanan deneysel koşullarda birim formülde fenjitteki Si = 3.5 tir. Velde (1965, 1967), muskovitten Al - seladonite kadar artan basınç ve artan sıcaklıkla karışabilirliği ve bu değerln jeotermobarometre olarak kullanılabilceğini belirlemiştir. Ayrıca, değişen P-T koşullarıyla duraysız olan fenjitlerin K -feldispat, filogopit, kuvars, su ve Si' ce daha fakir fenjite ayrıştığı belirlenmiştir (Velde 1965, 1967). Velde (1965)' nin elde ettiği sonuçlar, esas olarak düşük sıcaklıklarda, metamorfik kayaçlarda bulunan doğal fenjitlerin oluşumuyla uyum içerisindedir. Muskovitler ise görel olarak orta - yüksek sıcaklıklarda oluşan kayaçlar için tipiktir (Ernst, 1963). Yaklaşık %70 kadar yüksek bir seladonit içeriğine sahip fenjitler ise, mavişist fasiyesi kayaçlarındaki gibi, yüksek basınç metamorfik kayaçlarında görülür.

Fenjit jeotermobarometresi Velde (1967) tarafından önerilmiş ve P-T diyagramında beyaz mikalardaki maksimum Si içeriği eğrileriyle gösterilmiştir. Ancak, maksimum Si içeriğine sahip fenjit, yalnızca K - feldispat, kuvars ve trioktaedrik mika ile beraber oluştuğunda gözlenmektedir (Masonne ve Schreyer, 1987).

Sonuç olarak, fenjitlerin kimyasal bileşiminden elde edilen Si değerleri P-T diyagramına aktarılarak (Şekil 7) metamorfizma koşulları belirlenmektedir.



Şekil 6. K-Feldispatın bulunmadığı denge için denge sabiti konturları (Taranmış kısımlar, Log K= 2.0, 3.5 ve 5.0 için hata bantlarıdır, Nurminen, 1987).



Şekil 7. K-feldispat-kuvars-filogopit içeren toplulukta, fenjitin birim formülündeki Si içeriğini gösteren basınç-sıcaklık diyagramı (Masonne ve Schreyer, 1987' den sadeleştirilerek alınmıştır).

#### YILDIZELİ METASEDİMANTER GRUBUNDA YAPILAN JEOTERMOBAROMETRE ÇALIŞMALARI

Yıldızeli yöresinde yüzeyleyen metamorfitlelerdeki metamorfizma koşullarını belirlemek amacıyla derlenen kayaç örnekleri üzerinde mineralojik bileşim ve minerallerin birbirleriyle olan dokanak ilişkileri gözönüne alınarak jeotermobarometrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Alpaslan, 1993). Bu örneklerde yapılan çalışmalar sonucunda MA - 472 nolu örnekte plajiyoklaz - hornblend, MA - 299 nolu örnekte granat - muskovit - biyotit - plajiyoklaz, MA - 413 nolu örnekte granat - muskovit - biyotit - plajiyoklaz - disten ve MA - 141 nolu örnekte ise muskovit - biyotit - klorit ve granat - muskovit - biyotit - klorit jeotermobarometresi çalışmaları yapılmıştır.

**Sıcaklık belirlemeleri:** Birlikte oluşan granat ve biyotit mineralleri arasındaki dengelenme sıcaklığı Ferry ve Spear (1978) ve Newton ve Haselton (1981) jeotermometre hesaplamalarına göre Fe - Mg değişimi kullanılarak hesaplanmıştır. Beraber oluşan biyotit ve klorit arasındaki Fe - Mg değişimi de diğer bir termometre olarak (Grambling, 1990) kullanılmıştır. Amfibolitler-

de ise amfibollerdeki Al içeriği ve plajiyoklazlardaki Ca/Na oranı jeotermobarometre (Plyusnina, 1982) olarak kullanılmıştır.

**Basınç belirlemeleri:** Metapelitik kayalarda yapılan çalışmalarda (Alpaslan, 1993) jeobarometre için üç metodun kullanılabilceği belirlenmiştir:

- Granat-Al-silikat-plajiyoklaz (GASP) jeobarometresi (Newton ve Haselton, 1981),

- Al-silikat minerallerinin bulunmadığı topluluklarda granat-muskovit-biyotit-plajiyoklaz jeobarometresi (Ghent ve Stout, 1981)

- Fenjit-klorit-biyotit jeobarometresi (Powell ve Evans, 1983)

#### Plajiyoklaz - Hornblend Jeotermobarometresi

MA - 472 nolu örnekte yapılan EMA analiz sonuçlarından (Çizelge 4) gidilerek hesaplanan plajiyoklazlardaki Ca/Na oranları ve hornblendlerdeki Al içeriği hesaplanarak ilişkili diyagrama aktarılmış (Şekil 8) ve amfibolitlerde etkin olan basınç sıcaklık koşulları belirlenmiştir. Şekil 8' de MA - 472 nolu örneği etkileyen metamorfizma koşullarının 545 - 560°C ve 3.64 - 4.72 kbar arasında değiştiği görülmektedir.



**Granat - muskovit - plajiyoklaz - disten jeotermobarometresi**

MA - 413 nolu örnekte bulunan granat, muskovit, biyotit ve disten minerallerinin EMA analiz sonuçlarından (Çizelge 5) elde edilen parametreler, metin içerisinde verilen hesaplama yöntemi ile ilgili formüllerde yerine konularak, bu kayaç örneğinin aşağıdaki basınç - sıcaklık koşullarında metamorfizmaya uğradığı belirlenmiştir:

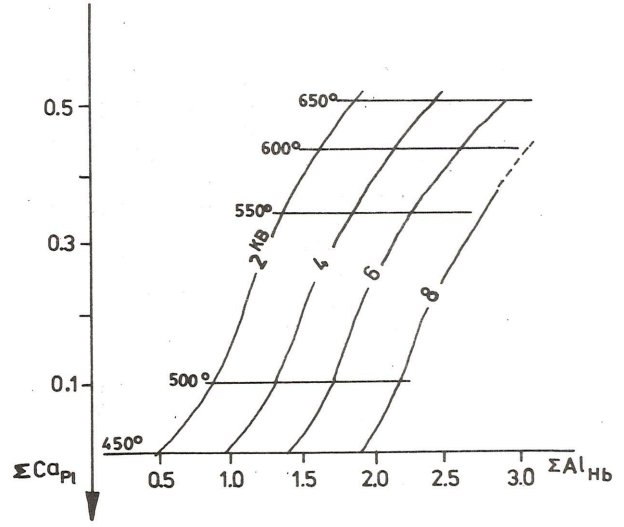
sıcaklık (°C)	basınç (bar)
551 - 489	5365 - 6770
(Ferry ve Spear, 1978)	(Ghent ve Sout, 1981)
572 - 500	5560 - 7496
(Newton ve Haselton, 1981)	
555 - 489	5240 - 7040
(Ferry ve Spear, 1978)	(Newton ve Haselton, 1981)

**Granat - muskovit - biyotit - plajiyoklaz jeotermobarometresi**

MA - 299 nolu kayaç örneğinde gözlenen granat, muskovit, biyotit ve plajiyoklaz minerallerinde yapılan EMA analiz sonuçları (Çizelge 6) yardımıyla hesaplanan parametreler ilgili formüllerde yerine konularak bu örnekte etkin olan basınç ve sıcaklık koşulları belirlenmiştir. Bu örnekte, sıcaklık belirlemeleri Ferry ve Spear (1978)' e göre, basınç belirlemeleri ise Ghent ve Stout (1981)' e göre saptanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda örneğin 667-612°C sıcaklık ve 7505-8673 bar basınç koşullarında metamorfizmaya uğradığı belirlenmiştir.

**Muskovit - biyotit - klorit jeotermobarometresi**

MA - 141 nolu örnekte gerçekleştirilen çalışmalarda, bu kayaç örneğinde klorit - muskovit - biyotit jeotermobarometresi yönteminin uygulanabileceği belirlenmiştir. Bu amaçla, örnek içerisinde gözlenen klorit - biyotit - muskovit minerallerinin kimyasal bileşimi EMA yöntemiyle belirlenmiştir (Çizelge 7). Analiz sonuçlarından gidilerek hesaplanan  $1nK$  değeri 11.4529-11.4338 arasında bulunmuştur. Bu değer, Şekil 9' da verilen diyagrama aktarıldığında; örneğin etkileyen basıncın 5.0 kbar vğe sıcaklığın ise 450°C olduğu belirlenmiştir.



Şekil 8. MA-472 nolu örnekteki plajiyoklaz ve hornblend minerallerinin kimyasal bileşimlerinden belirlenen değerlerin P-T diyagramındaki gösterimi (taralı alan).

**Yıldızeli Yöresinin Metamorfik Evrimi**

Yıldızeli yöresinde yapılan jeotermobarometre çalışmaları sonucu elde edilen basınç-sıcaklık değerleri tek bir diyagram üzerine aktarılarak (Şekil 10) yöre için metamorfik basınç-sıcaklık yolu belirlenmiştir. Buna göre; ilk metamorfik evre oldukça yüksek bir basınç aralığı ile belirlenmektedir. Daha sonra ise metamorfizma koşullarında bir düşme görülmektedir. Bu düşüşün ise, metamorfitlerin sıg kabuksal düzeylere yükselimi sırasında oluşan dekompresyondan kaynaklanabileceği söylenebilmektedir.

**KAYNAKLAR**

- Agrinier P, Javoy M, Smith DC, Pineau F, 1985, Carbon and oxygen isotopes in eclogites, amphibolites, veins and marbles from the Gneiss region, Norway, Chemical Geol 52; 145-162
- Ahn, J.H. and Peacor, D.R., 1986, Transmission and analytical electron microscopy of the smectite-to-illite transition. Clays and Clays Minerals, 34, 145-162
- Alpaslan, M., 1993, Yıldızeli yöresi (Sivas batısı) Metamorfitlerinin Petrolojik İncelenmesi, C.Ü. Fen-Bilimleri Enst., Doktora tezi, 359 s. (yayımlanmamış).

Çizelge 5. MA-413 nolu örnekten elde edilen analiz sonuçları

Oksit/oxide	Biyotit Biotite		Muskovit Muscovite		Granat Garnet		Plajiyoklaz Plagioclase	
	19	17	2	11	9	14	4	5
SiO <sub>2</sub>	35.33	32.78	45.49	43.93	38.15	37.41	62.67	61.44
TiO <sub>2</sub>	1.71	1.46	0.64	0.58	0.00	0.00	0.11	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.28	18.78	36.25	35.24	21.81	21.80	23.14	23.41
FeO	16.44	18.05	1.06	1.67	36.19	29.52	0.00	0.00
MnO	0.00	0.17	0.00	0.00	0.61	4.12	0.00	0.00
MgO	9.61	8.75	0.58	0.62	3.36	1.81	0.00	0.00
CaO	0.26	0.22	0.00	0.00	1.95	5.75	4.34	3.95
Na <sub>2</sub> O	0.21	0.12	0.96	0.96	0.00	0.00	9.02	8.77
K <sub>2</sub> O	8.94	8.85	10.63	10.35	0.00	0.00	0.10	0.13
Top.	91.78	89.18	95.61	93.95	102.07	100.41	99.38	97.70
tox	4.655	4.887	3.993	4.108	9	10	2.672	2.714
Katyon Cation								
Si	5.505	5.328	6.046	6.002	5.992	5.968	2.785	2.775
Ti	0.199	0.178	0.064	0.059	0.001	0.002	0.003	0.000
Al	3.520	3.598	5.678	5.675	4.038	4.098	1.212	1.246
Fe	2.129	2.453	0.118	0.191	4.754	3.938	0.000	0.000
MnO	0.002	0.024	0.000	0.000	0.080	0.556	0.003	0.000
Mg	2.220	2.120	0.115	0.116	0.786	0.430	0.000	0.000
Ca	0.042	0.038	0.000	0.000	0.328	0.983	0.206	0.191
Na	0.062	0.038	0.246	0.267	0.004	0.000	0.777	0.768
K	1.767	1.835	1.801	1.804	0.000	0.000	0.005	0.007
Top.	17.44	17.62	16.07	16.12	15.98	15.97	4.991	4.987

$$\begin{aligned} \text{Mg/Fe}_{(gr)} &= 0.166 - 0.109 & \text{Mg/Fe}_{(bi)} &= 1.041 - 0.855 \\ \text{LnKd}_{(gr/bi)} &= -1.8359 - 2.0597 & P(\text{bar}) &= 7.000 - 8.000 \\ X_{Ca}(gr) &= 0.055 - 0.167 & X_{Alm} &= 0.799 - 0.666 \\ X_{(gro)} &= 0.055 - 0.167 & X_{An(plj)} &= 0.209 - 0.198 \\ \text{LnK}_4 &= 2.68 - 0.321 \end{aligned}$$

Termometre hesaplaması

Ferry ve Spear (1978)

$$0 = 12.454 - 4.662T(^{\circ}\text{K}) + 0.057P(\text{bar}) + \{(3RT\ln K_1)/[(\text{Mg/Fe}_{(gr)})/(\text{Mg/Fe}_{(bi)})]\}$$

Newton ve Haselton (1981)

$$T(^{\circ}\text{K}) = [1661 - 0.755T(^{\circ}\text{K}) * X_{gr}(Ca) + 2089 + 0.00956P(\text{bar})]/(0.7820 - \ln K^*)$$

Jeobarometre hesaplaması

Newton ve Haselton (1981)

$$P = (P_0 - RT\ln K)/VA(\text{dis}) \quad P_0 = -1.17 + 0.0238 T (^{\circ}\text{C})$$

Ghent ve Stout (1981)

$$-1.802P = 4124.4 - 22.061 T + RT\ln K_4$$

Anderson DJ, Lindsley DL 1988, Internally consistent solution models for Fe-Mg-Mn-Ti oxides: Fe-Ti oxides, Am Mineral 73; 714-726

Anovitz LM, Essene EJ 1987a, Phase equilibria in the system CaCO<sub>3</sub>-MgCO<sub>3</sub>-FeCO<sub>3</sub>, J Petrol 28, 389-414

Anovitz LM, Essene EJ 1987b, Compatibility of geobarometers in the system CaO-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> (CFAST): implications for garnet mixing models. J Geol. 95: 633-645

Anovitz LM, Essene EJ 1989, Thermobarometry and pressure-temperature paths in the Greenville Province of Ontario. J Petrol

Aranovich LY, Podlesskii KK (1983) The cordierite-garnet-sillimanite equilibrium experiments and applications. In: Saxena SK (ed): Kinetics and

Çizelge 6. MA-299 nolu örnekten elde edilen EMA analiz sonuçları

Oksit Oxide	Biyotit Biotite		Muskovit Muscovite		Granat Garnet		Plajiyoklaz Plagioclase	
	29	26	5	23	32	28	1	11
SiO <sub>2</sub>	35.37	36.97	65.95	65.46	44.19	45.43	35.90	38.48
TiO <sub>2</sub>	1.14	1.67	0.00	0.00	0.55	0.54	0.00	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.11	20.22	19.61	19.25	33.60	34.08	20.63	22.45
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00
FeO	13.13	11.94	0.25	0.00	2.49	2.70	15.13	15.98
MnO	0.68	0.65	0.09	0.11	0.13	0.14	21.65	21.33
MgO	13.33	13.97	0.00	0.00	0.77	0.81	3.22	3.35
CaO	0.11	0.00	0.63	0.50	0.00	0.00	0.73	1.16
Na <sub>2</sub> O	0.15	0.00	10.79	10.72	0.52	0.50	0.00	0.00
K <sub>2</sub> O	10.02	9.64	0.18	0.18	10.89	10.70	0.00	0.00
Top.								
Total	92.04	95.21	97.50	96.22	92.62	94.61	97.26	102.79
tOX	4.637	4.410	2.699	2.729	4.146	4.076	10	9
Katyon Cation								
Si	2.729	2.713	2.962	2.974	3.049	3.055	5.948	5.982
Al <sup>IV</sup>	1.271	1.287	0.00	0.00	0.951	0.945	0.00	0.00
Al <sup>VI</sup>	0.376	0.462	1.038	1.031	1.782	1.780	4.029	4.114
Cr	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000
Fe <sup>2+</sup>	0.847	0.733	0.009	0.000	0.144	0.153	2.097	2.078
Mn	0.044	0.040	0.003	0.004	0.008	0.008	3.036	2.806
Mg	1.533	1.528	0.000	0.000	0.079	0.082	0.795	0.776
Ca	0.009	0.000	0.030	0.024	0.000	0.000	0.130	0.194
Na	0.022	0.000	0.940	0.944	0.070	0.066	0.000	0.000
K	0.986	0.903	0.010	0.010	0.959	0.926	0.000	0.000
Ti	0.066	0.092	0.000	0.000	0.029	0.028	0.000	0.005
Top.								
Total	7.883	7.767	4.992	4.987	7.070	7.049	16.035	15.955

$$\begin{aligned} \text{Mg/Fe}_{(gr)} &= 0.379 - 0.374 & X_{Alm} &= 0.346 - 0.355 \\ \text{Mg/Fe}_{(bi)} &= 1.717 - 1.976 & X_{gr} &= 0.021 - 0.033 \\ \text{LnKd}_{(gr/bi)} &= -1.5822 - -1.6645 & X_{an(plj)} &= 0.031 - 0.025 \\ P(\text{bar}) &= 7.000 - 8.000 & a_{bi} &= 0.043 - 0.032 \\ X_{Ca} &= 0.031 - 0.025 & a_{mus} &= 0.602 - 0.324 \\ X_{pir} &= 0.131 - 0.133 & \text{LnK}_4 &= 1.654 - -0.130 \end{aligned}$$

Termometre hesaplaması: Ferry ve Spear (1978) ve Newton ve Haselton (1981)  
Jeobarometre hesaplaması: Newton ve Haselton (1981) ve Ghent ve Stout (1981)

equilibrium in mineral reactions. Springer, Berlin Heidelberg New York pp. 173-198

Berman RG, Engi M, Greenwood HJ, Brown TH 1986, Derivation of internally consistent thermodynamic data by the technique of mathematical programming: a review with application to the system MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. J Petrol 27, 1331-1364

Bohlen SR, Boettcher AI 1981, Experimental investigations and geological applications of orthopyroxene geobarometry. Am Mineral 66, 951-964

Bohlen SR, Boettcher AI 1982, The quartz-coesite transformation: a precise determination and the effects of other components. J Geophys Res 87, 7073-7078

Bohlen SR (1987) Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites.



Çizelge 7.S MA-141nolu örnekten elde edilen EMA analiz sonuçları

Oksit/oxide	Biyotit/biotite			Klorit/chlorite			Muskov./musc.	
	23	18	19	6	10	7	9	19
SiO2	36.52	40.66	30.29	32.59	38.03	38.68	46.50	45.27
TiO2	0.97	0.28	0.13	0.00	0.05	0.06	0.11	0.36
Al2O3	17.42	29.47	18.48	27.64	31.17	33.08	33.57	31.86
Cr2O3	0.97	0.28	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
FeO	10.14	5.05	13.48	4.06	5.72	2.15	1.99	2.43
MnO	0.34	0.28	0.35	0.31	0.23	0.06	0.33	0.07
MgO	15.54	7.00	19.40	8.27	10.86	4.00	1.25	1.10
CaO	0.00	0.10	0.50	0.31	0.41	0.18	0.00	0.02
Na2O	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.19	1.12
K2O	9.40	5.83	1.50	0.01	0.01	0.02	7.30	9.63
Top./total	90.63	88.67	84.33	92.19	86.48	88.23	92.24	91.93
tOX	4.60	4.33	4.88	6.45	5.50	5.84	4.07	4.17
<b>Katyon/Cation</b>								
Si	2.79	2.93	2.46	3.50	3.48	3.76	3.15	3.14
Al <sup>iv</sup>	1.20	1.06	1.54	0.50	0.51	0.23	0.84	0.85
Al <sup>vi</sup>	0.37	1.43	0.22	2.99	2.84	3.55	1.84	1.74
Fe <sup>2+</sup>	0.65	0.30	0.91	0.36	0.43	0.17	0.17	0.14
Mn	0.022	0.017	0.024	0.028	0.018	0.005	0.019	0.004
Mg	1.77	0.75	2.34	1.32	1.48	0.58	0.12	0.11
Ca	0.00	0.008	0.044	0.036	0.04	0.019	0.00	0.001
Na	0.045	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.157	0.151
K	0.919	0.536	0.155	0.001	0.001	0.002	0.632	0.853
Ti	0.056	0.015	0.008	-	-	-	-	-
Cr	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004
Top./Total	7.84	7.07	7.72	8.75	8.83	8.33	6.89	7.03

$$\ln K = 11.4529 - 11.4338$$

$$\ln K = (X_{\text{mus}} * X_{\text{phl}}^3) / (X_{\text{cel}}^4 * X_{\text{clin}})$$

$$X_{\text{cel}} = 4 X_{K,A} * X_{Mg,Ml} * X_{Al,Ml} * X_{\square,M2} * X_{Si,T}^4 * X_{OH,V}^2$$

$$X_{\text{mus}} = 9.38 X_{K,A} * X_{Al,Ml}^2 * X_{\square,M2} * X_{Al,T} * X_{Si,T}^3 * X_{OH,V}^2$$

$$X_{\text{phl}} = 9.38 X_{K,A} * X_{Mg,Ml}^2 * X_{Mg,M2} * X_{Al,T} * X_{Si,T}^3 * X_{OH,V}^2$$

$$X_{\text{clin}} = 64 X_{Mg,M2}^3 * X_{Mg,Ml}^2 * X_{Al,Ml} * X_{Al,T} * X_{Si,T}^3 * X_{OH,V}^8$$

J Géol. 24, 617-632

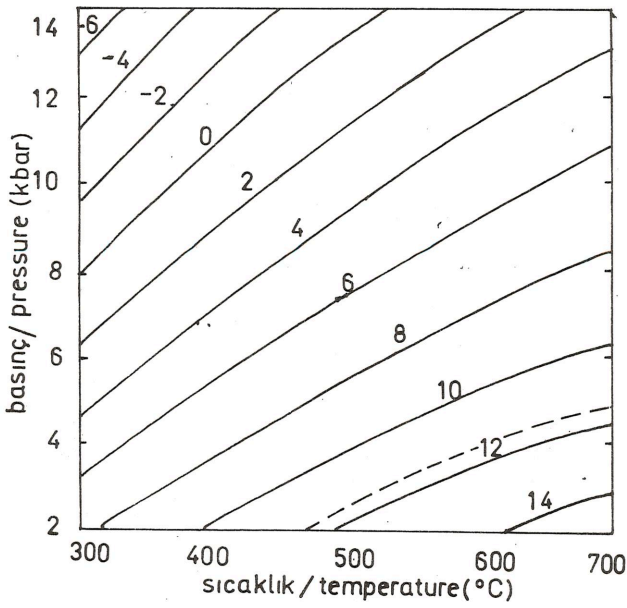
Bohlen SR, Wall VJ, Boettcher AL 1983a, Experimental investigations and geologic applications of equilibria in the system FeO-TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. Am Mineral 68, 1049-1058

-----, -----, ----- 1983b, Experimental investigations and application of garnet granulite equilibria. Contr Mineral Petrol 83, 52-61

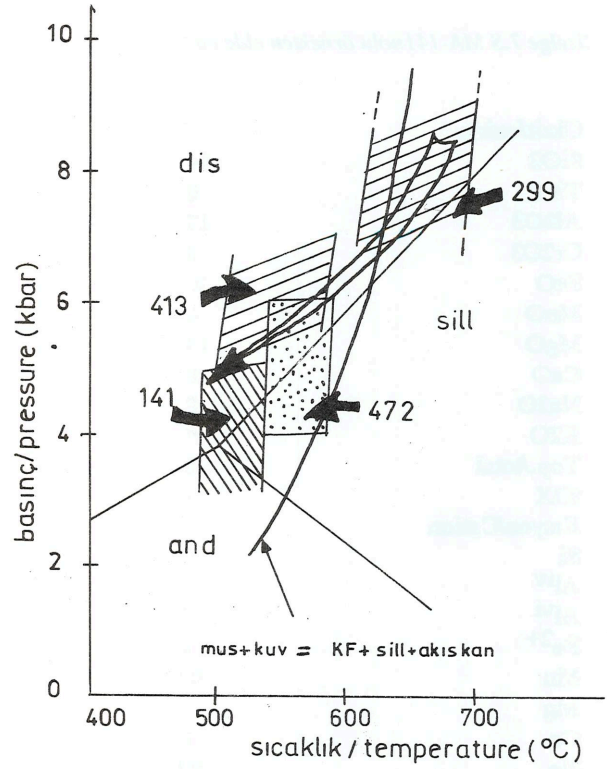
-----, -----, ----- 1983c, Geobarometry in granulites. In: Saxena, SK (ed) Kinetics and equilibrium in mineral reactions, advances in Physical Geochemistry, 3, pp. 141-172. Springer-Verlag, New York

-----, Dietz JM, Zec CP, Governale RC 1986a, Thermobarometer for corundum-bearing pelites. Geol Soc America Abstracts with programs, 18, 545

-----, Liotta JJ 1986, A barometer for garnet amphi-



Şekil 9. MA-141 nolu örnekte muskovit, biyotit ve klorit minerallerinin kimyasal analizlerinden hesaplanan  $\ln K$  değerinin Muskovit (sela) + klorit = muskovit + biyotit + kuvars + su reaksiyonu için hazırlanan P-T diyagramındaki konumu.



Şekil 10. Analiz edilen örneklerden elde edilen basınç ve sıcaklık değerlerini gösteren basınç-sıcaklık diyagramı. Alüminyum silikat üçlü noktası Holdaway (1971)'den alınmıştır. İç boş ok, olası P-T yolunu gösterir.

bolites and garnet granulites. J Petrol 27, 1025-1056

Bottinga Y, Javoy M 1987, Comments of stable isotope geothermometry: system quartz-water. Earth and Planetary Sci Lett 84, 406-414

Brown WL, Parsons I., 1985, Calorimetric diagram approaches to two feldspar geothermometry: a critical. Am Mineral 70, 356-361

Buddington AF, Lindsley DH 1964, Iron-titanium oxide minerals and their synthetic equivalents. J Petrol 5, 310-357

Carman JH, Gilbert MC 1983, Experimental studies on glaucophane stability. Am J Sci 283-A, 141-437

Chatterjee ND 1972, The upper stability limit of the assemblage paragonite-quartz and its natural occurrences. Contr Mineral Petrol 34, 288-303

Chatterjee ND 1976, Margarite stability and compatibility relations in the system  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  as a pressure-temperature indicator. Am Mineral 61, 699-709

Chatterjee ND, Johannes W, Leistner H 1984, The system  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ : new phase equi-

libria, some calculated phase relations and their petrological applications. Contr Mineral Petrol 88, 1-13

Chernosky JV, Day HW, Caruso LJ 1985, Equilibria in the system  $\text{MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ : experimental determination of the stability of Mg-anthophyllite. Am Mineral 70, 223-236

Chopin C 1984, Coesite and pure pyrope in high grade blueschists of the western Alps: a first record and some consequences. Contr Mineral Petrol 58, 255-262

Chopin C, Schreyer W 1983, Magnesiochloritoid and magnesiochloritoid: two index minerals of pelitic blueschists and their preliminary phase relations in the model system  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ . Am J Sci 283-A, 72-96

Cotkin SJ 1987, Conditions of metamorphism in an



- early Paleozoic blueschist. Schist of Skookum Gulch, northern California. *Contr Mineral Petrol* 96, 192-200
- Crawford WA, Fyfe WS 1965, Calcite-aragonite equilibria at 100°C. *Science* 144, 1549-1570
- Day HW 1973, The high temperature stability of muscovite plus quartz. *Am Mineral* 58, 255-262
- Day HW, Chernosky JV, Kumin HJ 1985, Equilibria in the system MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: a thermodynamic analysis. *Am Mineral* 70, 237-248
- Di Pisa A, Francheschelli M, Leoni L, Meccheri M, 1985. Regional variation of the metamorphic tanssect across the Tuscanid I Unit and its implications on the alpine metamorphism (Apuan Alps, North Tuscany). *Neues Jahrbuch fur mineralogie, Abhandlungen* 151, 197-211
- Egger RG, Kerrick DM 1981, Metamorphic equilibria in the siliceous dolomite system: 6 kbar experimental data and geologic implications. *Geochim Cosmochim Acta* 45, 1039-1049
- Ellis DJ 1980, Osumilite-sapphirine-quartz granulites from Enderby Land, Antarctica: P-T conditions of metamorphism, implications for garnet-cordierite equilibria and the evolution of the deep crust. *Contr Mineral Petrol* 74, 201-210
- Ellis DJ, Green DH (1979) An experimental study of effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contrib Mineral Petrol* 71, 13-22
- Ernst WG (1963) Significance of phengitic micas from low grade schists. *Am Mineral* 58, 255-262
- Essene EJ 1982, Geologic thermometry and barometry. In: Ferry JM (ed): *Characterization of Metamorphism Through Mineral Equilibria, Reviews in Mineralogy*, 10, pp 153-206, Mineral. Soc. of America.
- Essene EJ 1983, Solid solutions and solvi among metamorphic carbonates with applications to geologic thermometry. In: Reeder, RJ (ed) *Carbonates: Mineralogy and chemistry, Reviews in Mineralogy*, 11, pp 77-96, Mineral Soc America
- Essene EJ 1989, The current status of thermobarometry in metamorphic rocks. In: Daly JS, Cliff RA, Yardley BWD (eds) *Evolution of metamorphic belts, Geol Soc Special Publication* 43, pp. 1-45
- Essene EJ, Hensen BJ, Green DH 1970, Experimental study of amphibolite and eclogite stability. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 3, 378-384
- Fawcett JJ, Yoder HS 1966, Phase relationships of chlorite in the system MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *Am Mineral* 51, 353-380
- Ferry JM, Spear FS (1978) Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. *Contrib Mineral Petrol* 66: 113-117
- Ferry JM (1979) A map of chemical potential differences within an outcrop. *Am Mineral* 64 pp. 966-985
- Ferry JM 1980, A comparative study of geothermometers and geobarometers in pelitic schists from southern-central Maine. *Am Mineral* 65, 720-732
- Ferry JM (1984, A biotite isograd in south-central Maine, USA: mineral reactions, fluid transfer. *J Petrol* 25, 871-893
- Flowers GC, Hegleson HC 1983, Equilibrium and mass transfer during progressive metamorphism of siliceous dolomites. *Am J Sci* 283, 230-286
- Frey M, Teichmuller M, Teichmuller R, Mullis J, Kunze B, Breitschmid A, Gruner U, Schwizer B 1980, Very low grade metamorphism in external parts of the Central Alps: Illite crystallinity, coal rank and fluid inclusion data. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 73, 173-203
- Friedman I, O'Neil JR 1977, Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. *Data of Geochemistry*, 6 th edn, US Geol Survey Prof Paper 440 KK, 61 pp.
- Ganguly J, Saxena SK (1984) Mixing properties of aluminosilicate garnets: constraints from natural and experimental data, and applications to geothermobarometry. *Am Mineral* 69, 88-97
- Gasparik T 1984, Experimental study of subsolidus phase relations and mixing properties of pyroxene in the system CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. *Geochim Cosmochim Acta* 48, 2537-2546

- Ghent ED, Stout MZ (1981) Geobarometry and geothermometry of plagioclase-biotite-garnet-muscovite assemblages. *Contrib Mineral Petrol* 76, 113-117
- Goldsmith JR (1911) The melting and breakdown reactions of anorthite at high pressures and temperatures. *Am Mineral* 65, 272-284
- Graham CM (1974) Metabasic amphiboles of the Scottish Dalradian. *Contrib Mineral Petrol* 47, 163-185
- Graham CM, Powell RA (1984) Garnet-hornblende geothermometer: calibration testing and application to the Pelona schist, Southern California. *J Metam Geol* 184: 13-31
- Grambling, J.A., 1990, Internally-consistent geothermometry and H<sub>2</sub>O barometry in metamorphic rocks: the example garnet-chlorite-quartz. *Contrib. Mineral Petrol.*, 105, p. 617-628
- Green DH, Ringwood AE 1967, An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. *Geochim Cosmochim Acta* 31, 767-833
- Green DH, Ringwood AE 1972, A comparison of recent experimental data on the gabbro-garnet-granulite-eclogite transition. *J Geol* 80, 277-288
- Greenwood HJ 1962, Metamorphic reactions involving two mineral components. *Cornegie Institute of Washington Yearbook* 61, 82-85
- Greenwood HJ 1967, Wollastonite: stability in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> mixtures and occurrence in a contact metamorphic aureole, near Salmo, British Columbia. *Am Mineral* 52, 1669-1680
- Griffen, D.T. and Ribbe P.H., 1973, The crystal chemistry of staurolite. *Am. J. Sci.*, 273-A, 479-495
- Haas H, Holdaway MJ 1973, Equilibria in the system Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O involving the stability limits of pyrophyllite and the thermodynamic data of pyrophyllite. *Am J Sci* 273, 449-464
- Hariya Y, Kennedy GC (1968) Equilibrium study of anorthite under high pressure and high temperature. *Am J Sci* 226, 193-203
- Harley SL, Green DH (1982) Garnet-orthopyroxene barometry for granulites and peridotites. *Nature*, 300, 697-701
- Harley SL (1984a) The solubility of alumina in orthopyroxene coexisting garnet in FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> and CaO-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. *J Petrol* 25: 665-696
- Harley SL (1984b) An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. *Contrib Mineral Petrol* 86: 359-373
- Harley SL 1984c, Comparison of the garnet-orthopyroxene geobarometer with recent experimental studies and applications to natural assemblage. *J Petrol* 25, 697-712
- Harley SL 1985, Garnet-orthopyroxene bearing granulites from Enderby Land, Antarctica: metamorphic pressure-temperature-time evolution of the Archaean Napier Complex. *J Petrol* 26, 819-856
- Harley SL 1987, A pyroxene-bearing meta-ironstone and other pyroxene-granulites from Enderby Land, Antarctica: further evidence for very high temperature (>980°C) Archaean regional metamorphism in the Napier Complex. *J Meta Petrol* 5, 341-356
- Hays JF (1966) Lime-alumina-silica Yb Carnegie Instn Wash 65, 234-239
- Haselton HT, Hovis GL, Hemingway BS, Robie RA 1983, Calorimetric investigation of the excess entropy of mixing in analbite-sanidine solid solutions: lack of evidence for Na, K short range order and implications for two feldspar thermometry. *Am Mineral* 68, 398-413
- Hegleson, H.C., Delaney, J.M., Nesbitt, H.W. and Bird, D.K., 1978, Summary and critique of the thermobarometric properties of rock forming minerals, *Am. J. Sci.*, 278-A
- Heinrich W, Athaus E 1980, Die obere Stabilitätsgrenze von Lawsonit plus Albit bzw. Jadeit. *Fortschritte der Mineralogie* 58, 49-50
- Hemley JJ, Montoya JW, Marenko JW, Luce JW 1980, Equilibrium in the system Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O and some general implications for alteration mineralization processes. *Economic Geol* 75, 210-228
- Hensen BJ, Green DH (1973) P-T grids for silica-undersaturated granulites in the system (MAS



- (n+4) and FMA (n+3)- tools for the derivation of P-T paths for metamorphism. *Contrib Mineral Petrol* 5: 255-271
- Heatanen A (1974) Amphiboles pairs, epidote minerals, chlorite and plagioclase in metamorphic rocks. Northern Sierra Nevada, California. *Am Mineral* 59, 22-40
- Hodges KV, Spear FS (1982) Geothermometry, geobarometry and the  $Al_2SiO_5$  triple point at Mt Moosilauke, New Hampshire. *Am Mineral* 67, 1118-1134
- Hodges KV, Crowley PD (1985) Error estimation and empirical geothermobarometry for pelitic systems. *Am Mineral* 70, 702-709
- Holdaway, M.J., 1971, Stability of andalusite and the aluminium silicate phase diagram. *Am. J. Sci.*, 271, 97-131
- Holdaway MJ, Dutrow BI, Hinton RW 1988, Devonian and Carboniferous metamorphism in west-central Maine: the muscovite-almandine geobarometer and the staurolite problem revisited. *Am Mineral* 73, 20-47
- Holland TJB 1979, Experimental determination of the reaction  $paragonite=jadeite+kyanite+H_2O$  and thermodynamic data for part of system  $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ , with application to eclogites and blueschists. *Contr Mineral Petrol* 68, 293-301
- Holland TJB 1980, The reaction  $albite=jadeite+quartz$  determined experimentally in the range 600-1200°C. *Am Mineral* 65, 129-134
- Holland TJB 1988, Preliminary phase relations involving glaucophane and applications to high pressure petrology: new heat capacity and thermodynamic data. *Contr Mineral Petrol* 99, 134-142
- Itaya T 1981, Carbonaceous material in pelitic schists of the Sanbagawa metamorphic belt in Central Shikoku, Japan. *Lithos* 14, 215-224
- Ito K, Kennedy GC 1971, An experimental study of the basalt-garnet granulite-eclogite transition. In: Hecock JG (ed) *The structure and Physical Properties of the Earth's Crust*, *Am Geophys Un Monograph*, Series 14, 303-314
- Jenkins DM 1984, Upper-pressure stability of synthetic margarite plus quartz. *Contr Mineral Petrol* 88, 332-339
- Jenkins DM, Newton RC, Goldsmith JR 1983, Fe-free zoisite stability relative to clinozoisite. *Nature*, 304, 622-623
- Jenkins DM, Newton RC, Goldsmith JR 1985, Relative stability of Fe-free zoisite and clinozoisite. *J Geol* 93, 663-672
- Johannes W, Puhon D 1971, The calcite-aragonite equilibrium reinvestigated. *Contr Mineral Petrol* 31, 28-38
- Johannes W, Bell PM, Mao MK, Boettcher AL, Chipman DW, Hays JF, Newton RC, Seifert F 1971, An interlaboratory comparison of piston-cylinder pressure calibration using albite breakdown reaction. *Contr Mineral Petrol* 32, 24-38
- Kerrick DM 1972, Experimental determination of muscovite+quartz stability with  $P_{H_2O} < P_{Tot}$ . *Am J Sci* 272, 946-958
- Kerrick DM, Crawford KE, Randazzo AF 1974, Review of metamorphic mixed volatile ( $H_2O-CO_2$ ) equilibria. *Am Mineral* 59 729-762
- Kisch HJ 1980a, Incipient metamorphism of Cambro-Silurian clastic rocks from the Jamthland Supergroup, central Scandinavian Caledonides, western Sweden: illite crystallinity and vitrinite reflectance. *J Geol Soc London* 137, 271-288
- Kisch HJ 1980b, Illite crystallinity and coal rank associated with lower grade metamorphism of the Tavayanne greywacke, Hevetic zone, Swiss Alps. *Ecolgae Geologisches Hevetica* 75, 753-777
- Kisch HJ 1981, Coal rank and illite crystallinity associated with the zeolite facies of Southland and the pumpellyite-earnihg facies of Okago, southern New Zealand. *New Zealand J Geol & Geophys* 24, 349-360
- Kisch HJ 1987, Correlation between indicators of very low grade metamorphism. In: Ferry M (ed) *Low temperature metamorphism*. pp 227-300, Blackie, Glasgow
- Koons PO 1982, Experimental investigations of the behaviour of amphibole in the system  $Na_2O-Al_2O_3-$

- SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O at high pressures. *Contr Mineral Petrol* 79, 258-267
- Koons PO 1984, Ymplications to garnet-clinopyroxene geothermometry of non-ideal solid solution in jadeitic pyroxenes. *Contr Mineral Petrol* 88, 340-347
- Koons PO 1986, Relative geobarometry from high-pressure rocks of quartzofeldspathic composition from the Sessia Zone, Western Alps, Italy. *Contr Mineral Petrol* 93, 322-334
- Kostyuk EA (1970) Statistical analyses and paragenetic type of the metamorphic amphiboles. Nauka, Moskow (in Russian)
- Koziol AM, Newton RC (1988) Redetermination of the anortite breakdown reaction and improvement of the plagioclase-garnet-Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>-quartz geobarometer. *Am Mineral* 73: 216-223
- Krogh EJ 1988, The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer-a reinterpretation of existing experimental data. *Contr Mineral Petrol* 99, 44-48
- Kubler B 1967, La cristallinité de l'illite et les zones tectoniques, A la Baconnière. Neuchatel, 105-121
- Lang HM, Rice JM (1985) Geothermometry, geobarometry and T-X (Fe-Mg) relations in metapelites, Snow Peak, Northern Idaho, *J Petrol* 26, 889-924
- Leake BE (1962) On the non-existence of a vacant area in the Hallimond calciferous amphibole diagram. *Japan J Geol Geophys* 33, 1-13
- Lee HY, Ganguly J (1988) Equilibrium compositions of co-existing garnet and orthopyroxene: experimental determinations in the system FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> and applications. *J Petrol* 29: 93-113
- Lindsley DH (1983) Pyroxene thermometry *Am Mineral* 68: 477-493
- Liou JG 1971a, Synthesis and stability relations of prehnite, Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>. *Am Mineral* 56, 507-531
- 1971b, P-T stability of lömontite, wairakite, lawsonite and related minerals in the system Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *J Petrol* 12, 379-411
- 1971c, Analcime equilibria. *Lithos* 4, 389-402
- 1979, Zeolite facies metamorphism of basaltic rocks from the east Taiwan ophiolite. *Am Mineral* 64, 1-14
- , Kim HS, Maruyama S 1983, Prehnite-epidote equilibria and their petrologic applications. *J Petrol* 24, 321-342
- Manghnani MH 1970, Analcite-jadeite phase boundary. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 3, 456-461
- Maruyama S, Cho M, Liou JG 1986, Experimental investigations of blueschist-greenschist transition equilibria: pressure dependence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents in sodic amphiboles-a new geobarometer. *Geol Soc Am Spec Paper* 164, 1-16
- Masonne HJ, Schreyer W (1987) Phengite geobarometry based on the limiting assemblage with K-feldspar, phlogopite and quartz. *Contrib Mineral Petrol* 96, 212-224
- Matthews A, Goldsmith JR, Clayton RN 1983, Oxygen isotope fractionation involving pyroxenes: the calibration of mineral pair geothermometers. *Geochim Cosmochim Acta* 47, 631-644
- Mirwald PW, Masonne HJ 1980, Quartz=coesite transition and the comparative frictional measurement in piston-cylinder apparatus using talc-alsimag-glass (TAG) and NaCl high-pressure cells: a discussion. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte* 1980, 469-477
- Miyano T, Klein C 1986, Fluid behaviour and phase relations in the system Fe-Mg-Si-C-O-H and applications to high grade metamorphism of iron formations. *Am J Sci* 286, 540-575
- Moecher DP, Anovitz LM, Essene EJ 1988, Calculation of clinopyroxene-garnet-plagioclase-quartz geobarometers and applications to high-grade metamorphic rocks. *Contr Mineral Petrol* 100, 92-106
- Morikiyo T 1984, Carbon isotopic study on existing calcite and graphite in the Ryoke metamorphic rocks, northern Kiso district, central Japan. *Contr Mineral Petrol* 87, 251-259
- Nesbitt BE, Essene EJ 1982, Metamorphic thermometry and barometry of a portion of the Southern Blue



- Ridge Province. *Am J Sci* 282, 701-729
- Newton MS, Kennedy GC 1968, Jadeite, analcite, nepheline and albite at high temperatures and pressures. *Am J Sci* 266, 728-735
- Newton RC 1966, Some calc-silicate equilibria. *Am J Sci* 264, 204-222
- Newton RC 1983, Geobarometry of high-grade metamorphic rocks. *Am J Sci* 283-A, 1-28
- Newton RC, Haselton HT (1981) Thermodynamics of the garnet-plagioclase- $Al_2SiO_5$ -quartz geobarometers. In: Newton RC, Navrotsky A, Woods BJ (eds) Thermodynamics of minerals and melts. Springer, Berlin, Heidelberg New York, pp: 131-147
- Newton RC and Perkins D (1982) Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene-(clinopyroxene)-quartz. *Am Mineral* 67: 203-222
- Nitsch KH 1980, Reaktion von Bariumfeldspat (celcian) mit  $H_2O$  zu Cymrite unter metamorphen Bedingungen. *Fortschritte der Mineralogie* 58, 98-99
- Nitsch KH, Storre B, Topfer U 1981, experimentelle Bestimmung der Gleichgewichtsdaten der Reaktion  $1 \text{ Margarit} + 1 \text{ quartz} = 1 \text{ anortit} + \text{andalusit} / \text{disthen} + 1 \text{ H}_2\text{O}$ . *Fortschritte der Mineralogie* 59, 139-140
- Nurminen KB (1987) A recalibration of the chlorite-biotite-muscovite geobarometer *Contrib Mineral Petrol* 96, 519-522
- O'Hara MJ, Yarwood G 1978, High pressure-temperature point on an Archaean geotherm, magma genesis by crustal anatexis and consequences for garnet-pyroxene thermobarometry. *Phil Trans Roy Soc London Series A* 228, 441-456
- Okuyama-Kusunose Y, Itaya T 1987, Metamorphism of carbonaceous material in the Tono contact aureole, Kitakami Mountains, Japan, *J Metam Geol* 5, 121-139
- Órville, P.M., 1972, Plagioclase cation exchange equilibria with aqueous chloride solution: results at 700 C and 2000 bars in the presence of quartz, *Am. J. Sci.*, 272, 234-272
- Paria P, Bhattacharya A, Sen A 1988, The reaction garnet+clinopyroxene=2 orthopyroxene+anorthite: a potential geobarometer for granulites. *Contr Mineral Petrol* 99, 126-133
- Pattison DRM, Newton RC 1988, Reversed experimental calibration of the garnet-clinopyroxene KD (Fe-Mg) exchange thermometer. *Contr Mineral Petrol*
- Perchuk LL (1970) Equilibria of rock forming minerals. Nauka, Moscow (in Russian)
- Perchuk LL, Lavrent'eva IIV (1983) Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite. Kinematics and equilibrium in mineral reactions. Springer. Berlin Heidelberg New York. pp. 199-239
- Perkins D, Newton RC (1981) Charnocite geobarometers based on coexisting garnet - pyroxene-plagioclase - quartz. *Nature* 292, 144-146
- Perkins D, Chipera SJ 1985, Garnet - orthopyroxene - plagioclase - quartz barometry refinement and application to the English River subprovince and the Minnesota River Valley. *Contr Mineral Petrol* 89, 69-80
- Perkins D, Westrum EF, Essene EJ 1980, The thermodynamic properties and phase relations of some minerals on the system  $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ . *Geochim Cosmochim Acta* 44, 61-84
- Phillips GN 1980, Water activity changes across an amphibolite-granulite facies transition, Broken Hill, Australia. *Contr Mineral Petrol* 75,377-386
- Pigage, L.C. and Greenwood, W.R., 1968, Internally consistent estimates of pressure and temperature: the staurolite problem. *Ibid*, 282, 943-969
- Plyusnina LP (1982) Geothermometry and geobarometry of plagioclase-hornblende bearing assemblages *Contrib Mineral Petrol* 80, 140-146
- Powell R, Evans Ja (1983) A new geobarometer for the assemblage biotite-muscovite-chlorite-quartz. *J Metam Geol.* 1, 331-336
- Rejebian VA, Harris AG, Huebner S 1987, Cnodont color and textural alteration: an index to regional metamorphism, contact metamorphism and hydrothermal alteration. *Geol Soc Am Bull* 99, 471-479



- Richardson SW 1968, Staurolite stability in a part of the system Fe-Al-Si-O-H. *J Petrol* 9, 467-488
- Ringwood AE, Green DH 1964, Experimental investigations bearing on the nature of the Mohorovic discontinuity. *Nature* 201, 566-567
- Robert C, Javoy M, Kienast JR 1985, Coefficients de distribution et mesures isotopiques  $^{18}O/^{16}O$ : comparaisons thermometriques et barometriques sur quelques et micaschistes de la zone Sessia-Lanzo (Alpes italiennes). *Bull Mineral* 108, 699-711
- Robie RA, Hemingway BS 1984, Entropies of kyanite, andalusite and sillimanite: additional constraints on the pressure and temperature of the  $Al_2SiO_5$  triple point. *Am Mineral* 69, 298-306
- Robie RA, Hemingway BS and Fischer, J.R., 1978, Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar pressure and high temperatures. *Bull. U.S. Geol. Surv.*, 1452
- Robinson GR 1983, Calibration of the muscovite-biotite-quartz-aluminosilicate geobarometer. *Eos (Trans Am Geophys Un)* 64, 351
- Salje E 1986, Heat capacities and entropies of andalusite and sillimanite: the influence of fibrolitization on the phase diagram of the  $Al_2SiO_5$  polymorphs. *Am Mineral* 71, 1366-1371
- Sanders IS, Daly JS, Davies GR 1987, Late Proterozoic high pressure granulite facies metamorphism in the north-east Ox inlier, north-west Ireland. *J Metam Geol* 5, 69-85
- Sassi FP 1972, The petrologic and geologic significance of  $b_0$  value of potassium white micas in low-grade metamorphic rocks. An applications to the eastern Alps. *Tschermaks Mineralogie Petrographie Mitteilungen* 18, 105-113
- Sassi FP, Scolari A 1974, The  $b_0$  value of potassium white micas as a barometer in low grade metamorphism of pelitic schists. *Contr Mineral Petrol*
- Schramke JA, Kerrick DM, Lasagga AC 1987, The reaction muscovite + quartz = andalusite - K-feldspar + water. Part 1. Kinetics and mechanisms. *Am J Sci* 287, 517-559
- Schreyer W, Seifert F 1969, Compatibility relations of the high pressure phases in the system  $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ . *Am J Sci* 267, 371-385
- Schreurs J, Westra L 1986, The thermometric evolution of a Proterozoic, low-pressure, granulite dome, SW Finland. *Contr Mineral Petrol* 93, 236-250
- Seifert F 1974, Stability of sapphirine: a study of the aluminous part of  $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ . *J Geol* 82, 173-204
- Sen S, Bhattacharya A 1984, An orthopyroxene-garnet thermometer and its application to the Madras charnockites. *Contr Mineral Petrol* 88, 64-71
- Sharp ZD, Essene EJ, Anovitz LM, Metz GW, Westrum EF, Hemingway BS, Valley JW 1986, The heat capacity of monticellite and phase equilibria in the system  $CaO-MgO-SiO_2-CO_2$ . *Geochim Cosmochim Acta* 50, 1475-1484
- Skippen GB 1974, An experimental model for low-pressure meta morphism of siliceous dolomitic marble. *Am J Sci* 274, 487-509 .
- Slaughter J, Kerrick DM, Wall VJ 1975, Experimental and thermodynamic study of equilibrium in the system  $CaO-MgO-SiO_2-H_2O-CO_2$ . *Am J Sci* 275, 143-162
- Smith DC 1984, Coesite in the Caledonides and its implications for geodynamics. *Nature* 310, 641-644
- Smyth JR, Hatton CJ 1977, Coesite-sanidine grosspydite from the Roberts Victor kimberlite. *Earth Planet Sci Lett* 34, 284-290
- Sobolev NV, Yefimova ES, Koptil VI, Lav rent'yev YuG, Sobolev VS 1976, Coesite, garnet and omphacite inclusions in Yakutia diamonds-first finding of coesite parageneses. *Doklady Akademii Nauk SSSR* 230, 1442-1444
- Spear FS, Selverstone J (1983) Quantitative P-T paths from zoned minerals: theory and tectonic applications. *Contrib Mineral Petrol* 83. pp: 348-357
- Staudigel H, Schreyer W 1977, The upper thermal stability of clinocllore,  $Mg_5Al [AlSi_3O_{10}] (OH)_8$  at 10-35 kb  $P_{H_2O}$ . *Contr Mineral Petrol* 61, 187-198
- Storre B, Karotke E 1971, An experimental determinati



- on of the upper stability limit of muscovite+quartz in the range 7-20 kb water pressure. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte 1971, 237-240
- Tanner SB, Kerrick DM, Lassaga AC 1985, Experimental kinetic study of the reaction calcite+quartz=wollastonite+carbon dioxide from 1 to 3 kbar and 500-850°C. Am J Sci 285, 577-590
- Teichmüller M 1987, Organic material and very low grade metamorphism. In: Frey M (ed) Low temperature metamorphism pp 114-161, Blackie, Glasgow
- Thompson AB 1970a, A note on the kaolinite-pyrophyllite equilibrium. Am J Sci 268, 454-458
- Thompson AB 1970b, Laumontite-albite equilibria at low temperatures. Am J Sci 269, 267-275
- Thompson AB 1971, Analcite-albite equilibria at low temperatures. Am J Sci 271, 79-92
- Thompson AB (1976) Mineral reactions in pelitic rocks. Calculation of some P-T-X (Mg-Fe) phase relations. Am J Sci 276: 425-454
- Thompson AB, Frey M 1984, Illite crystallinity in the Western River Formation and its significance regarding the regional metamorphism of the early Proterozoic Goulburn Group, District of Mackenzie. In: Current Research, Part A, Geol Sur Can Paper 84-1A, 409-414
- Treiman AH, Essene EJ 1983, Phase equilibria in the system CaO-SiO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>. Am J Sci 283-A, 97-120
- Turner FJ 1968, Metamorphic Petrology, 1st edn. McGraw Hill, New York
- Velde B (1965) Phengitic micas: Synthesis, stability and natural occurrence. Am J Sci 263, 886-913
- Velde B (1967) Si<sup>4+</sup> content of natural phengites. Contrib Mineral Petrol 14, 250-258
- Wada GF, Suzuki K 1983, Carbon isotope thermometry calibrated by dolomite-calcite solvus temperatures. Geochim Cosmochim Acta 47, 697-706
- Weisbrod A 1973, Refinements of the equilibrium conditions the reaction Fe - cordierite = garnet + sillimanite + quartz (+H<sub>2</sub>O). Carnegie Institute of Washington Geophysical Lab Yearbook 72, 515-522
- Winkler HGF 1965, Petrogenesis of metamorphic rocks, 1st edn, Springer Verlag, Berlin, 237 pp
- Wintsch RP, O'Connell AF, Ranson BL, Wiechmann MJ 1981, Evidence for the influence of  $f_{\text{CH}_4}$  on the crystallinity of disseminated carbon in greenschist facies rocks, Rhode Island, USA. Contrib Mineral Petrol 77, 50-73