



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Γεωχημεία

Ενότητα 1: Γεωχημικές διεργασίες στο εσωτερικό
της γης

Χριστίνα Στουραϊτη

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος

Περιεχόμενα ενότητας

- **Γένεση μαγμάτων & τεκτονικό περιβάλλον**
(ανασκόπηση στις γνώσεις Πετρολογίας Πυριγενών)
- **Συντελεστής Κατανομής ιχνοστοιχείου**
μεταξύ στερεού – τήγματος
- **Ιοντικές υποκαταστάσεις**



Γεωχημικές διεργασίες στο εσωτερικό της γης

ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΠΥΡΙΓΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

1. Γεωχημεία Πυριγενών Πετρωμάτων

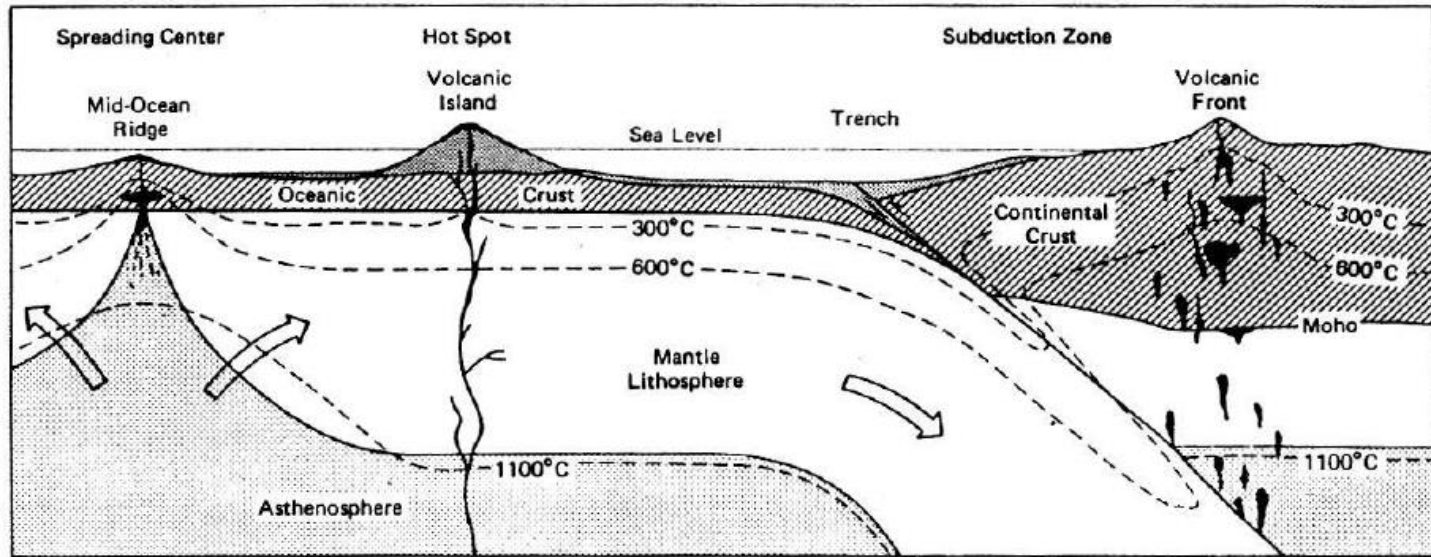


Figure 11.7 Schematic diagram showing divergent and convergent plate boundaries. Tholeiitic basalts erupting at the spreading center create new oceanic crust which is rafted away from the midocean ridge. The lithospheric slab is ultimately reincorporated into the mantle in the subduction zone. Calc-alkaline magmas are produced in this environment. Isotherms (dashed lines) are deflected upward by ascending magmas in both locations, and downward in the subduction zone itself; these control the *P-T* regime of metamorphism. Hot-spot igneous activity is illustrated by intraplate volcanism located spatially between these two tectonic environments.

Richardson and McSween, Geochemistry

1

Το μάγμα είτε α) διεισδύει και στερεοποιείται σε βάθος μέσα στο φλοιό της γης → πλουτώνια πετρώματα (plutonic), ή β) εκχύνεται στην επιφάνεια της γης → ηφαιστειακά πετρώματα (volcanic).

Table 1.1 Global rates of Cenozoic magmatism (after McBirney 1984).

Location	Rate (km ³ yr ⁻¹)	
	Volcanic rocks	Plutonic rocks
constructive plate boundaries	3	18
destructive plate boundaries	0.4–0.6	2.5–8.0
continental intra-plate	0.03–0.1	0.1–1.5
oceanic intra-plate	0.3–0.4	1.5–2.0
global total	3.7–4.1	22.1–29.5

Wilson, "igneous petrogenesis"

2

Πίνακας 1. Εκτίμηση των ποσοτήτων μαγματικών πετρωμάτων (πλουτώνια, ηφαιστειακά), που δημιουργούνται κατ' έτος (km³/yr) , στους 4 τύπους τεκτονικών περιβαλλόντων.

- * *
- * *
- * *

-Βασάλτες
 -ανδεσίτες, ρυοδακίτες (ενδιάμεσου % SiO
 -ρυόλιθοι (υψηλού % SiO₂)

Βασάλτες

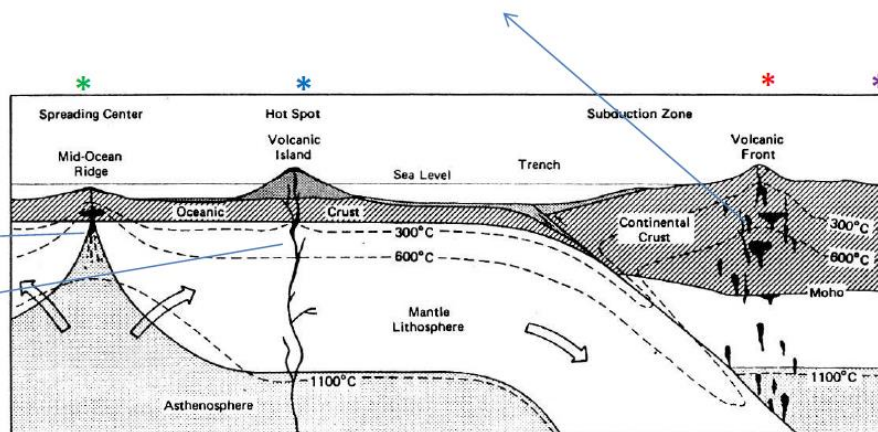


Figure 11.7 Schematic diagram showing divergent and convergent plate boundaries. Tholeiitic basalts erupting at the spreading center create new oceanic crust which is rafted away from the midocean ridge. The lithospheric slab is ultimately reincorporated into the mantle in the subduction zone. Calc-alkaline magmas are produced in this environment. Isotherms (dashed lines) are deflected upward by ascending magmas in both locations, and downward in the subduction zone itself; these control the *P-T* regime of metamorphism. Hot-spot igneous activity is illustrated by intraplate volcanism located spatially between these two tectonic environments.

Richardson and McSween, *Geochemistry*

3



1. Γεωχημεία Πυριγενών Πετρωμάτων

Τα πετρώματα του φλοιού της Γης κατηγοριοποιούνται σε δύο κύριους τύπους, με βάση τη μέση σύσταση τους (σε % SiO_2) και κατά συνέπεια την πυκνότητά τους: α) $\text{SiO}_2 \sim 52\%$ κ.β (μαφικής ή βασαλτικής σύστασης), β) 73% κ.β. (πυριτικής σύστασης ή *silicic*)

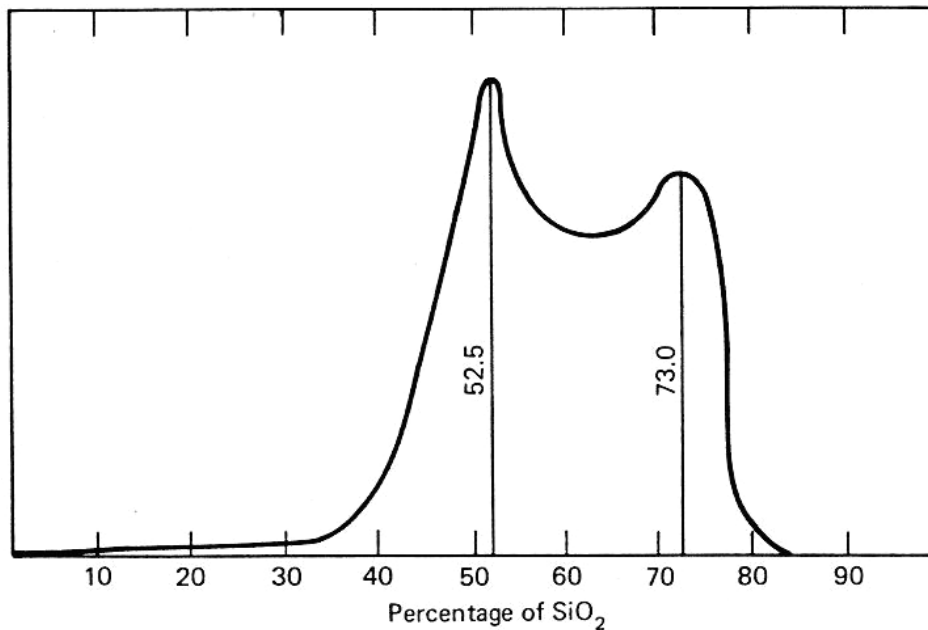
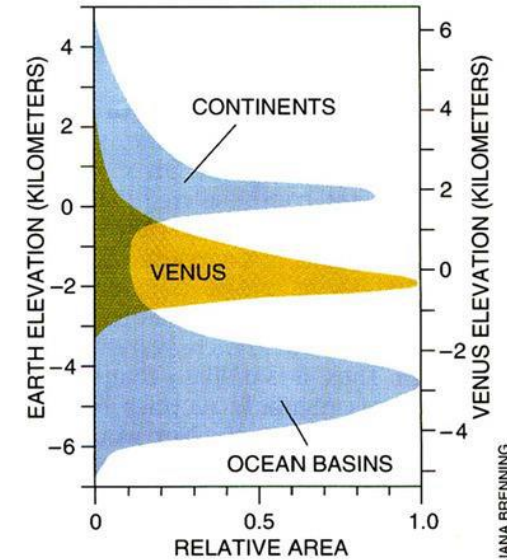


Figure 5.1 The frequency distribution of silica percentage in analyses of igneous rocks.

4



SURFACE ELEVATIONS are distributed quite differently on the earth (blue) and on Venus (gold). Most places on the earth stand near one of two prevailing levels. In contrast, a single height characterizes most of the surface of Venus. (Elevation on Venus is given with respect to the planet's mean radius.)

Taylor and McLennan, Sci. Amer. 1996

5

1. Γεωχημεία Πυριγενών Πετρωμάτων

- Έτσι από το μάγμα δημιουργείται ο φλοιός της γης. Η σύσταση του φλοιού μπορεί να είναι:
 - **μαφική** (πλούσια σε Mg, Fe, φτωχά σε Si), ή
 - **πυριτική – silicic** (υψηλού SiO₂) ή
 - **ενδιάμεση** των δύο προηγούμενων ακραίων συστάσεων.
- Στην πραγματικότητα αυτό που παρατηρούμε είναι ένα εύρος ενδιάμεσων συστάσεων των πυριγενών πετρωμάτων.



1. Γεωχημεία Πυριγενών Πετρωμάτων

- Κάποια μάγματα αντιπροσωπεύουν προϊόντα τήξης του μανδύα,
- άλλα αντιπροσωπεύουν προϊόντα τήξης του φλοιού (ειδικότερα σε τεκτονικά περιβάλλοντα ηπειρωτικών πλακών)
- άλλα μάγματα αποτελούν προϊόντα ανάμιξης των δύο προηγούμενων τύπων μαγμάτων.

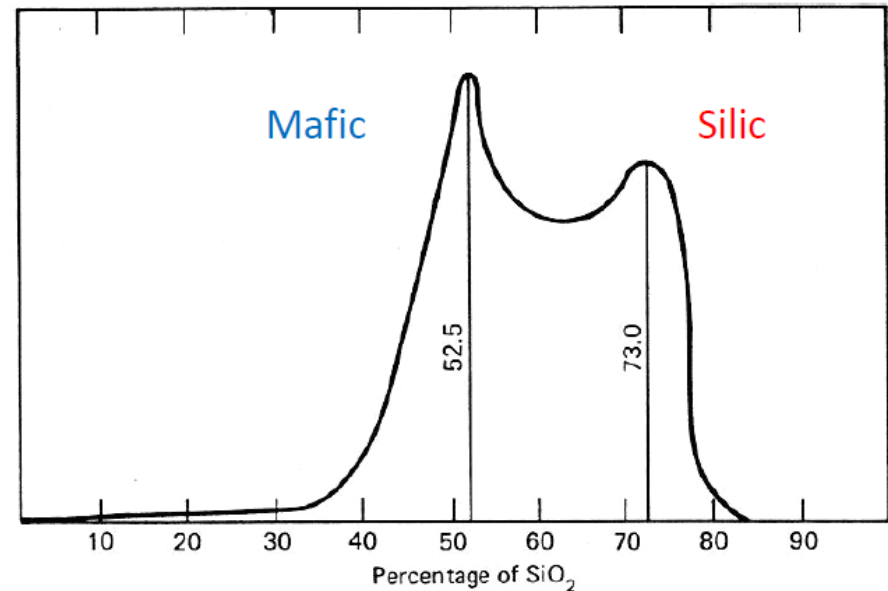


Figure 5.1 The frequency distribution of silica percentage in analyses of igneous rocks.

1. Γεωχημεία Πυριγενών Πετρωμάτων

- Ήδη από τις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα, ήταν γνωστή η σύσταση των πυριγενών πετρωμάτων. Η κατανόηση όμως του τρόπου σχηματισμού τους, δηλαδή γιατί κάποιες συστάσεις εμφανίζονται σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα, άρχισε με την έλευση της θεωρίας των λιθοσφαιρικών πλακών στη δεκαετία του 1960s.
- Η πρώτη πλήρη σειρά αναλύσεων κύριων στοιχείων, πυριγενών πετρωμάτων από διάφορα μέρη της γης δημοσιεύτηκε το 1917.
- Από αναλύσεις 5.159 δειγμάτων , προσδιορίστηκε ότι τα περισσότερα πυριγενή πετρώματα αποτελούνται από:
 - ένα μίγμα **10 κύριων στοιχείων** (O, Si, Al, Mg, Fe, Ca, Ti, Na, K, P)
 - και δευτερευόντως (συνήθως, <1%) από Mn and H₂O.



Κύρια Στοιχεία

- Η σύσταση ενός πυριγενούς πετρώματος αναφέρεται ως, επί τις % κατά βάρος σύσταση κάθε στοιχείου εκφρασμένο σε οξείδιο.
- Έτσι τυπικά σε μια χημική ανάλυση αναφέρονται 9 κύρια (major) και 2 δευτερεύοντα (minor) οξείδια στοιχείων.
- Συνήθως ο Fe αναφέρεται ως ολικός FeO ή ολικός Fe₂O₃.
- Μερικές φορές αναφέρονται και οι δύο καταστάσεις οξείδωσης [Fe²⁺ (FeO) και Fe³⁺ (Fe₂O₃)].



1. Γεωχημεία Πυριγενών Πετρωμάτων

- Όπως η κατανομή του ποσοστό του SiO_2 στα πυριγενή πετρώματα εμφανίζει δύο μέγιστα, ομοίως κατανέμεται και CaO και K_2O .
- Όλα τα άλλα κύρια στοιχεία έχουν μια κύρια κατανομή.

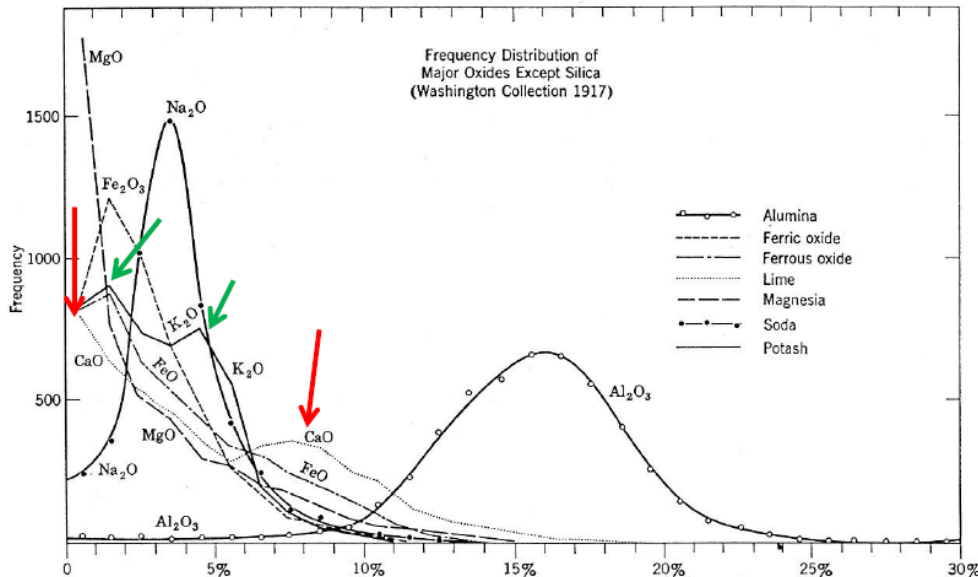


Figure 5.2 The frequency distribution of the percentages of the major oxides in analyses of igneous rocks. (Richardson and Sneesby, *Mineralog. Mag.* **19**, 309, 1922)

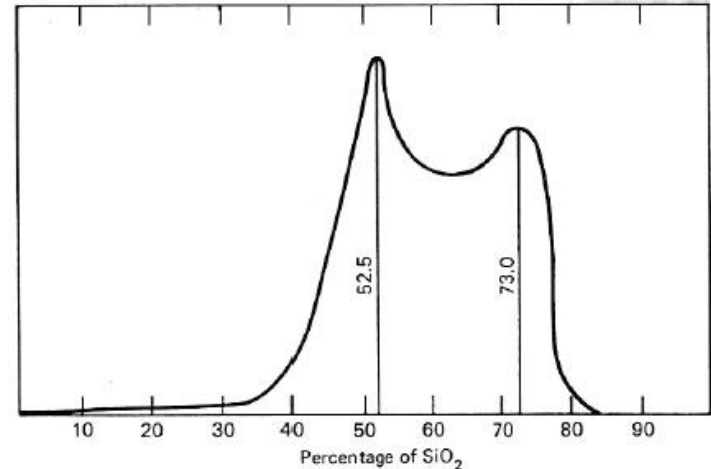


Figure 5.1 The frequency distribution of silica percentage in analyses of igneous rocks.

7

8

1. Γεωχημεία Πυριγενών Πετρωμάτων

- Τα κύρια στοιχεία συμμετέχουν σε διαφορετικές αναλογίες στα κύρια (πετρογενετικά) ορυκτά των πυριγενών πετρωμάτων.
- Τα ορυκτά αυτά συμμετέχουν σε διαφορετικές αναλογίες στη σύσταση των διαφόρων πετρωμάτων αλλά και η σύσταση ενός ορυκτού μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με τη σύσταση του πετρώματος.

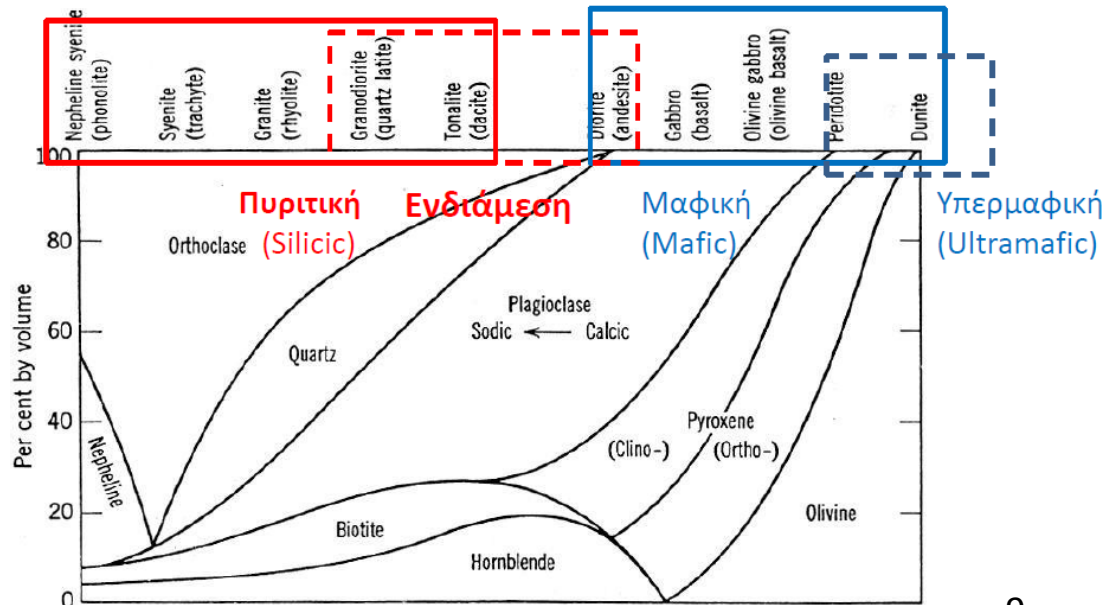


Figure 5.3 Approximate mineralogical composition of the commoner types of igneous rocks (effusive types in brackets).

9



Διάγραμμα TAS (total alkali scheme)

Μαγματικές Σειρές

Τα διπλανά σχήματα συνοψίζουν τις κυριότερες χημικές ταξινομήσεις των α) ηφαιστειακών & β) πλουτώνιων πετρωμάτων με βάση τη σύσταση τους σε SiO_2 και την συνολική συγκέντρωση $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (wt%).

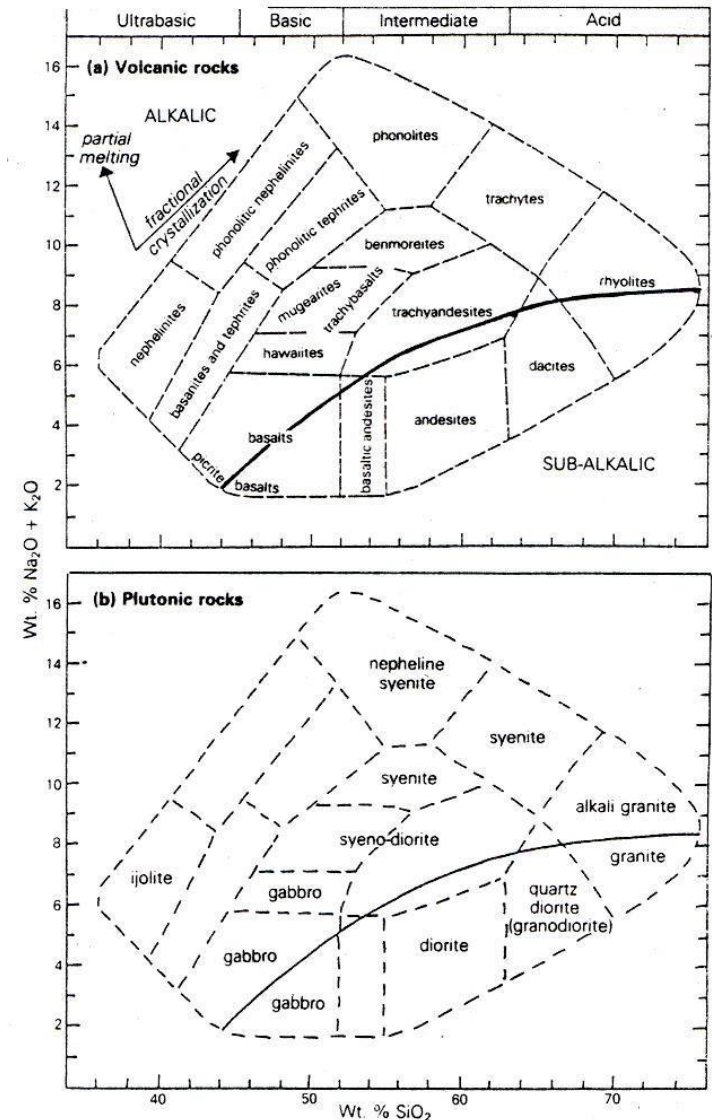
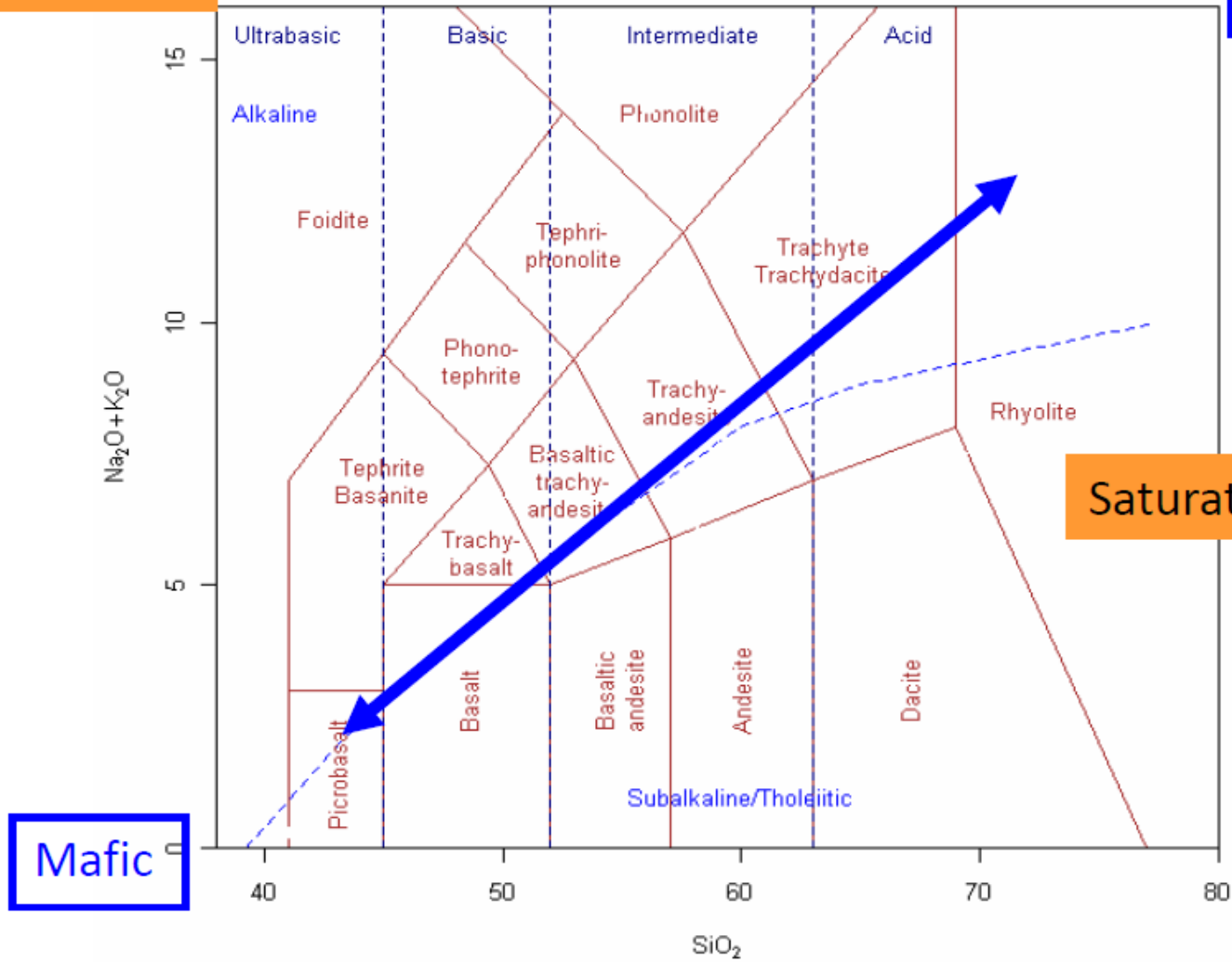


Figure 1.2 Nomenclature of normal (i.e. non-potassic) igneous rocks (a) after Cox *et al.* 1979). The dividing line between alkalalic and sub-alkalic magma series is from Miyashiro (1978).



Undersaturated

Felsic

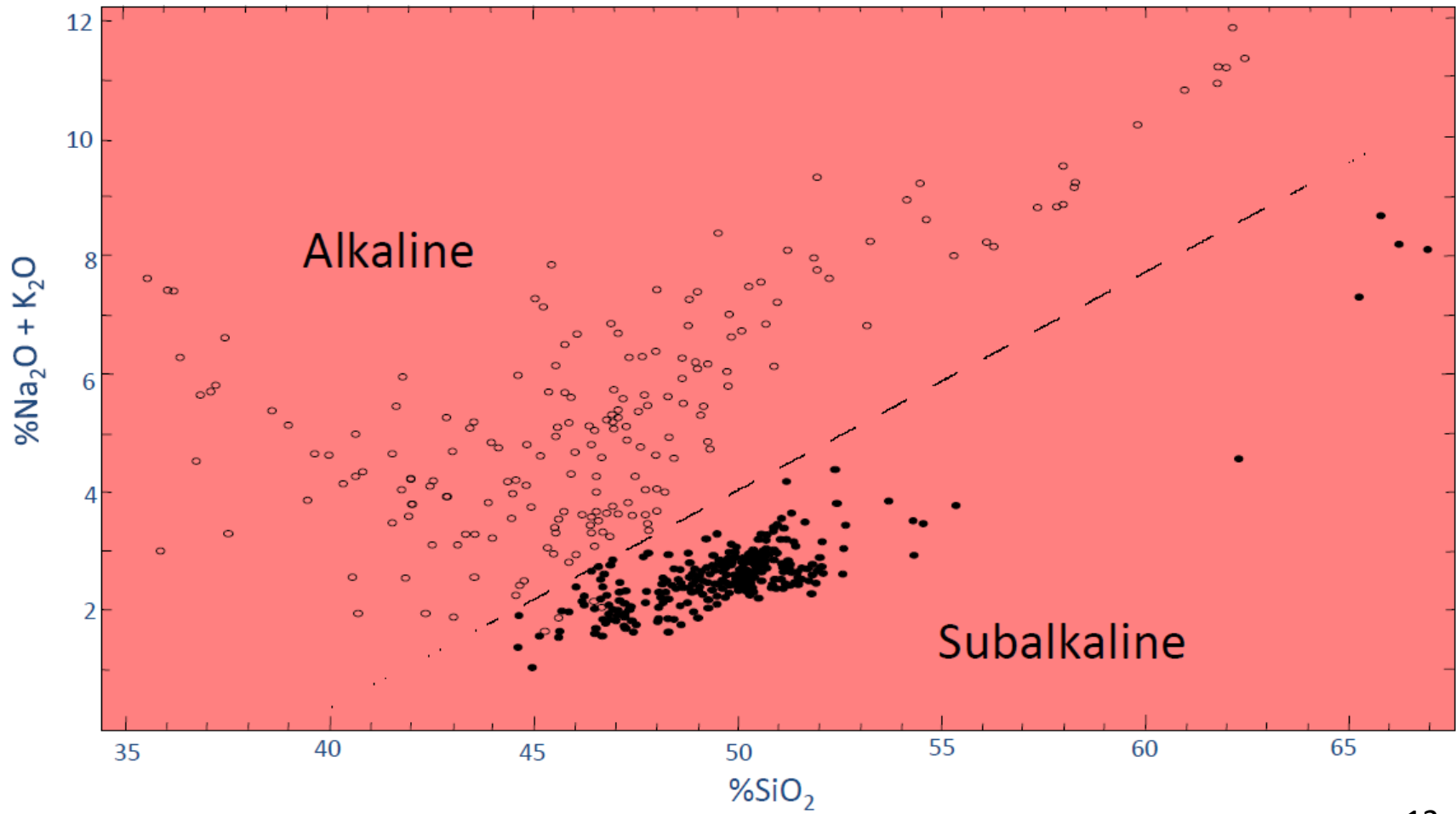


Mafic

Saturated



Μαγματικές Σειρές



12



Διάγραμμα AFM

Διάκριση των Υποαλκαλικών Μαγματικών Σειρών σε **Θολεϊτικές** και **Ασβεσταλκαλικές** σειρές.

AFM Διάγραμμα.

Διάκριση μεταξύ θολεϊτικών πετρωμάτων από την Ισλανδία, Mid-Atlantic Ridge, Columbia River Basalts και Hawaii (κόκκινοι κύκλοι), ασβεσταλκαλικά ηφαιστειακά πετρώματα από ηπειρωτικό ηφαιστειακό τόξο των Cascade, Β. Αμερική (μωβ κύκλοι) (Irving and Baragar (1971). Can. J. Earth Sci., 8, 523-548.

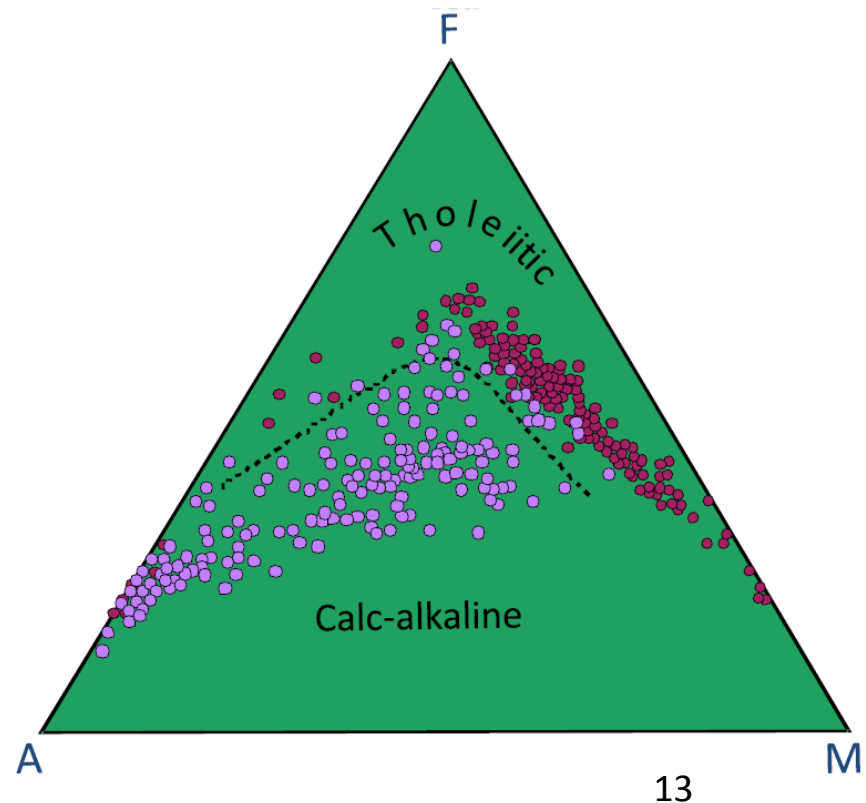


TABLE 8-1 Chemical Compositions of Some Common Igneous Rocks

	1 Oceanic alkali olivine basalt	2 Oceanic tholeiite basalt	3 Continental tholeiite basalt	4 Island arc dunite	5 Island arc andesite
SiO ₂	50.48	49.20	52.05	39.53	58.60
TiO ₂	2.25	2.03	1.70	0.01	0.89
Al ₂ O ₃	18.31	16.09	12.43	0.93	15.38
Fe ₂ O ₃	3.21	2.72	5.18	0.65	2.22
FeO	6.03	7.77	10.08	7.62	6.71
MnO	0.21	0.18	0.24	0.12	0.18
MgO	4.21	6.44	3.95	48.83	3.22
CaO	7.21	10.46	7.33	Trace	7.02
Na ₂ O	4.80	3.01	2.76	Trace	3.84
K ₂ O	1.93	0.14	2.07	—	1.46
P ₂ O ₅	0.74	0.23	0.28	—	0.25
H ₂ O ⁺	0.46	0.70	1.90	0.89	0.30
H ₂ O ⁻	0.38	0.95	0.36	0.16	0.07
Other				1.41	
Total:	100.22	99.92	100.33	100.15	100.14
K/Rb	267	950	498	215	807
Rb/Sr	0.09	0.02	0.04	0.025	0.038
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.7033	0.7034	0.7064	0.7091	0.7036

Sources:

- 1: Cenozoic alkali olivine basalt, Guadalupe Island; data from A. E. J. Engel et al., 1965, *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 76, p. 725, and Z. E. Peterman and C. E. Hedge, 1971, *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 82, p. 495.
- 2: Cenozoic tholeiite basalt, Atlantic Ocean, depth 2,910 m, 20°40' S, 13°16' W; data from A. E. J. Engel and C. G. Engel, 1964, *Science*, v. 144, p. 1332, and P. W. Gast, 1967, *Basalts (Poldervaart Treatise)*, Wiley (Interscience Division), v. 1, p. 325.
- 3: Jurassic tholeiite basalt, Nuanetsi region, Karroo Basin, South Africa; data from K. G. Cox et al., 1965, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., ser. A*, v. 257, p. 71, and W. I. Manton, 1968, *J. Petrol.*, v. 9, p. 30.
- 4: Permian dunite, Dun Mt., New Zealand; data from J. J. Reed, 1959, *New Zealand J. Geol. Geophys.*, v. 2, p. 16, and A. M. Stueber and V. R. Murthy, 1966, *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 30, pp. 1247—1248.
- 5: Quaternary pyroxene andesite, Talasea, New Britain; data from G. G. Lowder and I. S. E. Carmichael, 1970, *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 81, p. 27, and Z. E. Peterman et al., 1970, *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 81, p. 314.

	6 Island arc rhyolite	7 Continental rift leucite nephelinite	8 Gabbro of continental layered mafic pluton	9 Continental anorthosite	10 Continental batholith quartz monzonite
SiO ₂	74.22	39.77	48.08	53.40	65.49
TiO ₂	0.28	3.82	1.17	0.77	0.65
Al ₂ O ₃	13.27	12.53	17.22	23.96	14.49
Fe ₂ O ₃	0.88	6.02	1.32	0.91	2.11
FeO	0.92	8.62	8.44	3.02	2.90
MnO	0.05	0.27	0.16	—	0.10
MgO	0.28	4.45	8.62	1.88	2.45
CaO	1.59	11.88	11.38	9.85	4.29
Na ₂ O	4.24	4.86	2.37	4.17	2.80
K ₂ O	3.18	5.35	0.25	0.80	3.66
P ₂ O ₅	0.05	1.35	0.10	0.18	0.21
H ₂ O ⁺	0.80	0.60	1.01	0.60	0.56
H ₂ O ⁻	0.23	0.32	0.05	0.05	0.05
Other				0.43	0.15
Total:	99.99	99.84	100.17	100.06	99.91
K/Rb	251	352	550	>1,000	232
Rb/Sr	1.0	0.058	0.022	<0.01	0.311
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.7054	0.7051	0.7076	0.7053	0.7086

Sources:

- 6: Average Quaternary rhyolite, Taupo volcanic zone, New Zealand; data from A. Ewart and J. J. Stipp, 1968, *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 32, pp. 704, 712.
- 7: Quaternary leucite nephelinite, War Cemetery Flow, Nyiragongo volcano, Congo; data from K. Bell and J. L. Powell, 1969, *J. Petrol.*, v. 10, pp. 546, 549.
- 8: Chilled border gabbro, Tertiary Skaegaard intrusion, Greenland; data from L. R. Wager and G. M. Brown, 1967, *Layered Igneous Rocks*, Freeman, p. 158, pp. 193—194.
- 9: Gabbroic anorthosite, Precambrian Adirondack massif, New York; data from A. F. Buddington, 1939, *Geol. Soc. Am. Memoir* 7, p. 30, and S. A. Heath and H. W. Fairbairn, 1969, *N. Y. State Memoir* 18, p. 99.
- 10: Cretaceous Butte Quartz Monzonite, Kain quarry, Boulder batholith, Mont.; data from A. Knopf, 1957, *Am. J. Sci.*, v. 255, p. 89, and B. R. Doe et al., 1968, *Econ. Geol.*, v. 63, p. 898.



Μαγματικές Σειρές - Υποσειρές

Αλκαλικές σειρές

- Κορεσμένες
- Ακόρεστες

Ασβεσταλκαλικές σειρές

- χαμηλό K
- μέσο K
- υψηλό

ΜΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ		Αλκάλια (K+Na)	Fe-Mg	Al
Αλκαλικές		υψηλό	πλούσιο σε - Fe	Metaluminous to peralkaline
Υποαλκαλικές	Ασβεστ-αλκαλικές (Calc-alkaline)	χαμηλό έως μέσο	πλούσιο σε - Mg	Metaluminous to per-aluminous
	Θολεϊτικές Tholeiitic	Χαμηλό	πλούσιο σε - Fe	Metaluminous



1. Γεωχημεία Πυριγενών Πετρωμάτων

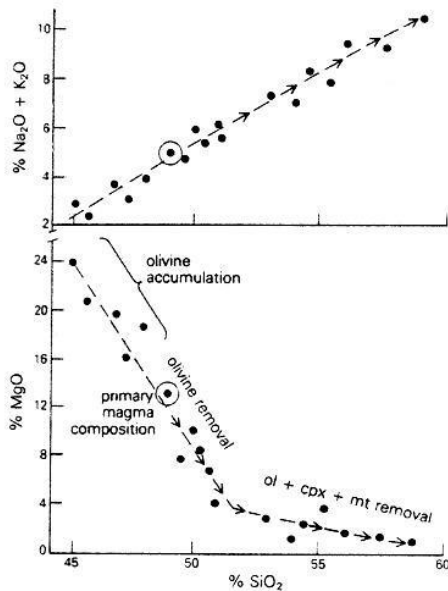


Figure 2.1 Harker variation diagrams of wt. % $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ and wt. % MgO versus wt. % SiO_2 for a suite of cogenetic volcanic rocks related by fractional crystallization of olivine, clinopyroxene and magnetite. The highly magnesian basalts ($\text{MgO} > 12\%$) may have accumulated olivine by crystal settling. This should be evident in their petrography, i.e. the samples should be highly olivine phyric.

15

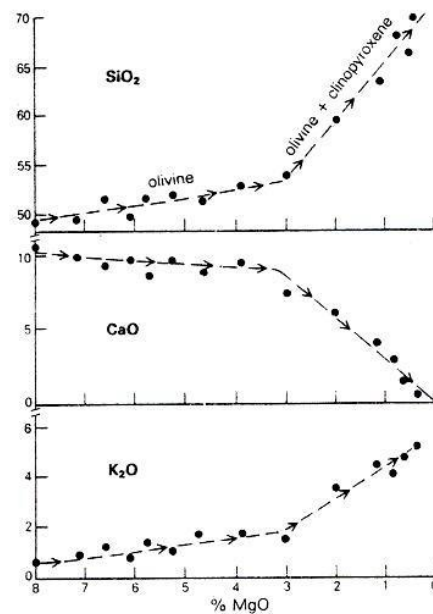


Figure 2.2 Harker-type variation diagrams, with wt. % MgO as abscissa, for a cogenetic suite of volcanic rocks related by fractional crystallization of olivine and clinopyroxene.

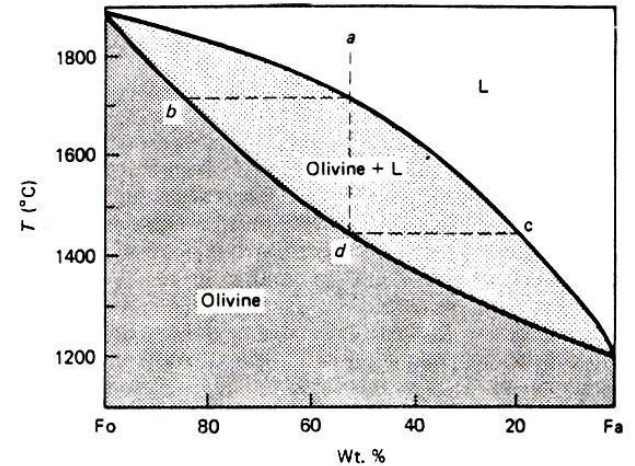


Figure 11.14 Phase diagram for the system forsterite (Mg_2SiO_4)-fayalite (Fe_2SiO_4), illustrating how fractional crystallization affects a solid solution series. Olivine crystals forming from a melt with initial composition *a* will range in composition from *b* to some point past *d*.

16

Ολιβίνης - $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$

Mg_2SiO_4 – Φοστερίτης

Fe_2SiO_4 – Φαϋαλίτης

Κλινοπυρόξενος - $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})[\text{Si}_2\text{O}_6]$

$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ – Διοψίδιος

$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ – Εδενβεργίτης

1. Γεωχημεία Πυριγενών Πετρωμάτων

- Μεταβολή σύστασης του βασαλτικού μάγματος ως συνάρτηση της Θερμοκρασίας (T) και της συγκέντρωσης σε SiO₂ και MgO (% κβ).
- Μαγματική διεργασία: κλασματική κρυστάλλωση \leftrightarrow μερική τήξη

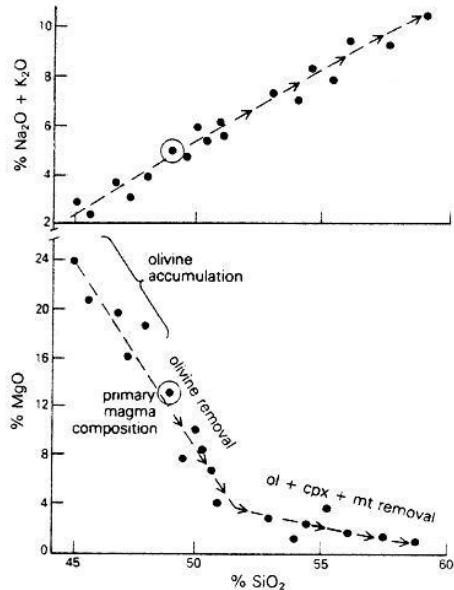


Figure 2.1 Harker variation diagrams of wt. % Na₂O + K₂O and wt. % MgO versus wt. % SiO₂ for a suite of cogenetic volcanic rocks related by fractional crystallization of olivine, clinopyroxene and magnetite. The highly magnesian basalts (MgO >12%) may have accumulated olivine by crystal settling. This should be evident in their petrography, i.e. the samples should be highly olivine phyric.

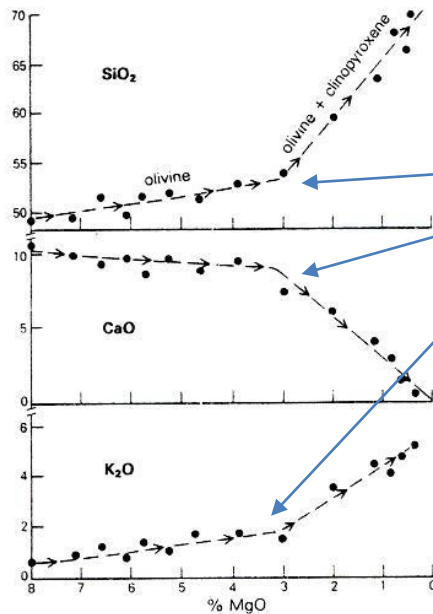


Figure 2.2 Harker-type variation diagrams, with wt. % MgO as abscissa, for a cogenetic suite of volcanic rocks related by fractional crystallization of olivine and clinopyroxene.

αλλαγή κλίσης γραμμής \rightarrow
ένδειξη εμφάνισης ή
εξαφάνισης ορυκτών



1. Γεωχημεία Πυριγενών Πετρωμάτων

Ιχνοστοιχεία

- Ιχνοστοιχεία: συγκέντρωση $< 0.1\%$ κβ \rightarrow
- συνήθως η συγκέντρωση των ιχνοστοιχείων αναφέρεται σε μονάδες *ppm* (parts per million) ή μονάδες *ppb* (parts per billion)
- Παρέχουν πληροφορίες (**ιχνηλάτες**) για τη σύσταση του μανδύα
- Παρέχουν πληροφορίες (ιχνηλάτες) για την προέλευση των μαγμάτων & πυριγενών πετρωμάτων (μανδύα ή φλοιό ?)
- Παρέχουν πληροφορίες για τις **μαγματικές διεργασίες** και τις συνθήκες **τήξης** και **κρυστάλλωσης**.



Ιχνοστοιχεία

- Συνήθως δεν αποτελούν κύρια δομικά συστατικά των κοινών πετρογενετικών ορυκτών (δεν συμμετέχουν στον χημικό τύπο του ορυκτού).
- Συμμετέχουν στα ορυκτά ως «προσμίξεις» (“contaminants”). Υποκαθιστούν κάποιο κύριο στοιχείο στην κρυσταλλική δομή του ορυκτού. Αυτό συμβαίνει όταν είναι συμβατές οι εξής παράμετροι:
 - Ιοντική ακτίνα
 - Ιοντικό φορτίο
 - Ηλεκτραρνητικότητα
 - Ενέργεια δεσμού της συγκεκριμένης θέσης στη κυψελίδα (lattice energy of substitution site)



«Κανόνες του GOLDSMITH»

Κανόνες που διέπουν τις υποκαταστάσεις των ιόντων (ιχνοστοιχείων) στο σύστημα ορυκτό – τήγμα (πυριγενή πετρώματα), είναι οι εξής:

1. **Ιοντική Ακτίνα (r):** Οι **ακτίνες των δύο ιόντων** να διαφέρουν $< 15\%$
2. **Φορτίο (z):** η **διαφορά σθένους** να μην είναι μεγαλύτερη από **1** και με την προϋπόθεση ότι διατηρείται η ουδετερότητα φορτίου στο ορυκτό.

Μεταξύ δύο ιόντων **ίδιου φορτίου** και **παρόμοιας ακτίνας**:

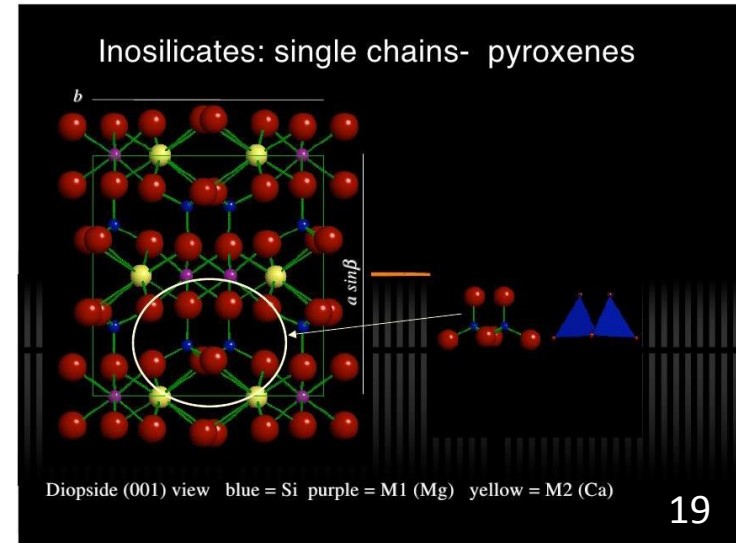
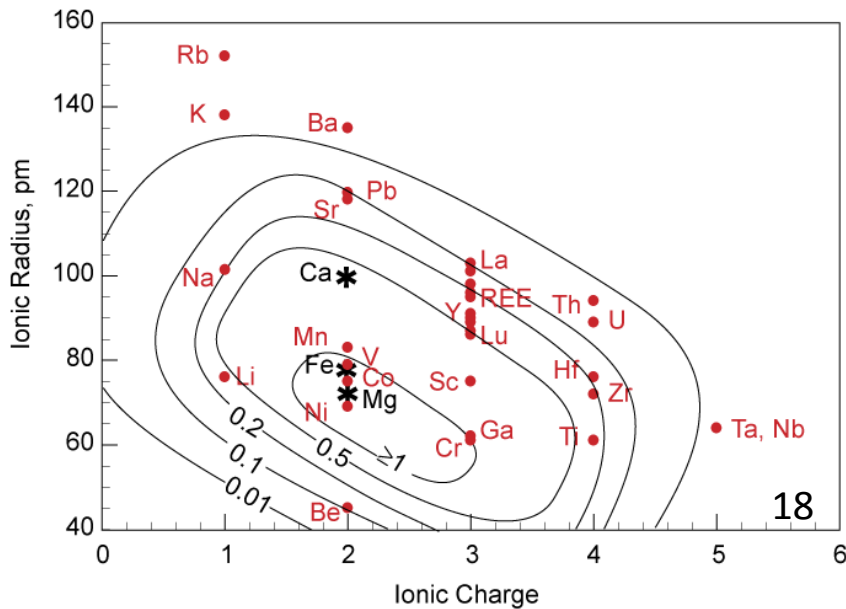
3. Το ιόν με το μεγαλύτερο **ιοντικό δυναμικό (z/r)** σχηματίζει ισχυρότερους δεσμούς και άρα προτιμάται περισσότερο.

Κανόνας του Ringwood

4. Το ιόν που έχει παρόμοια **ηλεκταρνητικότητα** με αυτό που θα υποκαταστήσει, είναι προτιμότερο γιατί αποσταθεροποιεί λιγότερο την κυψελίδα του κρυστάλλου .



Υποκαταστάσεις Ιχνοστοιχείων



Κρυσταλλική δομή κλινοπυροξένου

Ισόβαθμες στο διάγραμμα Ιοντική ακτίνας (picometers) vs. Ιοντικού φορτίου των συντελεστών κατανομής διαφόρων στοιχείων μεταξύ κλινοπυροξένου /τήγματος.

Τα κατιόντα που βρίσκονται συνήθως στον κλινοπυροξένο είναι σε θέσεις M1, M2 είναι Ca^{2+} , Mg^{2+} και Fe^{2+} όπως φαίνονται με *. Στοιχεία των οποίων οι ακτίνες και τα φορτία ομοιάζουν αυτά των κύριων στοιχείων, έχουν τους υψηλότερους συντελεστές κατανομής .

M1 : $\text{AlFe}^{3+}\text{Ti}^{4+}\text{CrVTi}^{3+}\text{ZrScZnMgFe}^{2+}\text{Mn}$

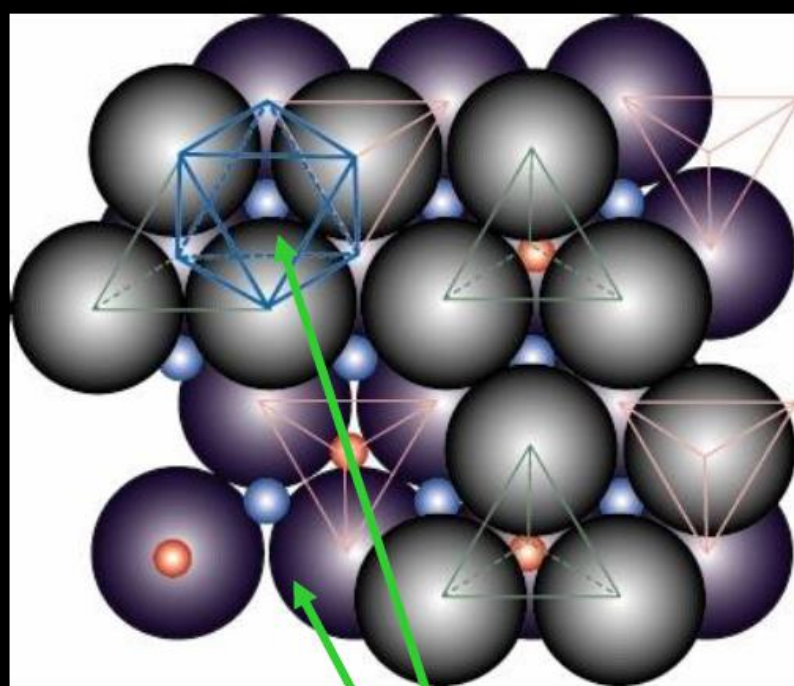
M2 : $\text{MgFe}^{2+}\text{MnLiCaNa}$

Υποκαταστάσεις Ιχνοστοιχείων

- Παράδειγμα: μικρή πιθανότητα υποκατάστασης μεταξύ δύο στοιχείων με μεγάλη διαφορά ηλεκτραρνητικότητας.
- Σπάνια βλέπουμε υποκατάσταση $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Cu}^+$ ή $\text{Ca}^{+2} \rightarrow \text{Cd}^{+2}$, εξαιτίας της διαφοράς ηλεκτραρνητικότητας.



Υποκαταστάσεις ιχνοστοιχείων προτίμηση θέσης



Fe^{2+}

Mg^{2+}



Fe^{2+}



Mg^{2+}



Ni^{2+}

Compatible
(right size & charge)



Au^{3+}

Incompatible
(size/charge does
not match)



Ag^{3+}

20

Κατανομή των ιχνοστοιχείων

Μπορούμε να υπολογίσουμε, εάν μια υποκατάσταση είναι ευφικτή ή προτιμάται περισσότερο από μια άλλη, χρησιμοποιώντας το **Συντελεστή Κατανομής** (k_d ή K, D) του Nerst μεταξύ στερεάς φάσης – τήγματος (McIntire, 1963):

- **Απλή περίπτωση ενός στερεού (solid) - τήγματος (melt):**

$${}^A k_d = [\text{conc. of A}]_{\text{solid}} / [\text{conc. of A}]_{\text{melt}}$$

- **Πολυφασικό σύστημα (ένα τήγμα – πολλά στερεά)**
χρησιμοποιούμε τον **Ολικό Συντελεστή Κατανομής (Bulk distribution coefficient)**:

$$\text{Bulk } {}^A k_d = {}^A K_d = D_A = [\text{modal conc. of A}]_{\text{solids}} / [\text{conc. of A}]_{\text{melt}}$$



Κατανομή των ιχνοστοιχείων

- Οι τιμές των K_d και D_A μας δείχνουν την τάση ενός στοιχείου να προτιμά λιγότερο ή περισσότερο (κατανέμεται) το τήγμα ή το στερεό.
- $D_A > 1$ Το στοιχείο είναι **ανταγωνιστικό** - compatible (συλλαμβάνεται - “captured”).
- $D_A = 1$ The element is **ουδέτερο** - neutral (“camouflaged”).
- $D_A < 1$ Το στοιχείο είναι **μη ανταγωνιστικό** - incompatible (ελεύθερο - “released”)



Κατανομή των ιχνοστοιχείων

Ο αυστηρός ορισμός του **Ολικού Συντελεστή Κατανομής - Bulk kd (“D”)** για ένα **πολυφασικό σύστημα**, ορίζεται ως εξής:

π.χ, για ένα ηφαιστειακό πέτρωμα, που αποτελείται από

διάφορα ορυκτά (a,b, c..., j ορυκτά) + **τήγμα** – liquid (l) (κρυσταλλωμένο γυαλί) είναι:

$$D = \sum_{i=1}^n x_i \cdot k_d^i = \sum_{i=1}^n x_i \cdot k_d^i$$

όπου:

τα x_a, x_b, \dots είναι η επί % συμμετοχή του κάθε ορυκτού (a,b, c..., j) στο πέτρωμα (γραμμομοριακό κλάσμα καθενός ορυκτού),

και τα k_d^a, k_d^b, \dots είναι οι συντελεστές κατανομής ορυκτού – τήγματος (mineral-melt partition coefficients) για κάθε διαφορετικό ορυκτό, a, b, c,...j που βρίσκεται σε ισορροπία με το τήγμα.



Κατανομή των ιχνοστοιχείων

Επίδραση της Θερμοκρασίας T και πίεσης P , στην κατανομή των ιχνοστοιχείων

- Εκτός από το ιοντικό **φορτίο (z)**, την **ακτίνα (r)** και την **ηλεκτραρνητικότητα**, η **θερμοκρασία (T)** και η **πίεση (P)** έχουν καθοριστικό ρόλο στην κατανομή των ιχνοστοιχείων στα ορυκτά, γιατί οι συνθήκες καθορίζουν τη **σταθερότητα** των ορυκτών στο τήγμα, δηλαδή καθορίζουν εάν ένα ορυκτό (στερεό) θα είναι, ή δεν θα είναι, παρόν σε ένα σύστημα (μάγμα).
- Επίσης, οι ιοντικές υποκαταστάσεις εξαρτώνται από τον τύπο της κρυσταλλική δομής, γιατί η κρυσταλλική δομή καθορίζει την **ειδική ενεργειακή κατάσταση της κυψελίδας** (μικρότερη δομική μονάδα του κρυστάλλου).
- Για μια δεδομένη κρυσταλλική διάταξη (κυψελίδα), αυτή η **ενέργεια της κυψελίδας** είναι συνάρτηση των συνθηκών T και P .
 - Έτσι η **ενέργεια της κυψελίδας ελαχιστοποιείται** (το ορυκτό είναι σταθερό) όταν γίνεται υποκατάσταση του «σωστού» **ιόντος**, δηλαδή του ιόντος με τον καλύτερο συνδιασμό μεγέθους, φορτίου, ηλεκτραρνητικότητας.
 - Μια υποκατάσταση είναι, ή, δεν είναι εφικτή, ανάλογα με το αν ικανοποιούνται οι περισσότεροι από τις προαναφερόμενες παραμέτρους. Αντίθετα, μια υποκατάσταση είναι λιγότερη πιθανή, εάν κάποια από τις παραμέτρους διαφέρει από την ιδανική.



Κατανομή των ιχνοστοιχείων

Συμπέρασμα:

- Τα **μη Ανταγωνιστικά στοιχεία (incompatible)** έχουν $k_d < 1$ για **όλα τα κοινά ορυκτά** στο μανδύα.
- Κατά συνέπεια, τα **μη Ανταγωνιστικά στοιχεία** έχουν και το $D < 1$, στα μανδουακά πετρώματα (περιδοτίτες), γιατί οι ενέργειες που απαιτούνται για τις υποκαταστάσεις τους είναι πολύ υψηλές, σε όλα τα μανδουακά ορυκτά.



Κατανομή των ιχνοστοιχείων

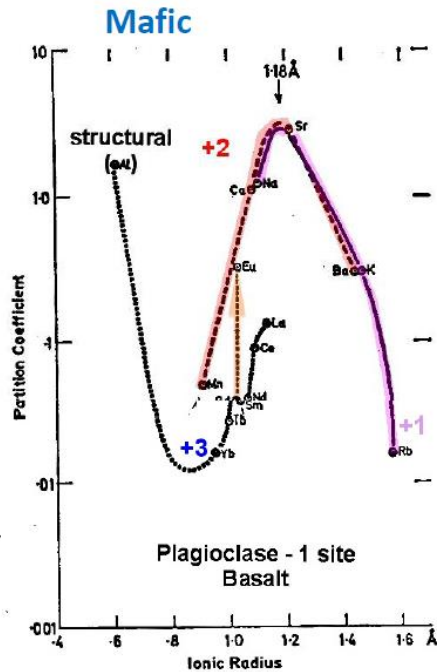


Fig. 3. Plagioclase/matrix. Alkali olivine basalt, Takashima, data of HIGUCHI and NAGASAWA (1969). Ionic radii of WHITTAKER and MUNTUS (1970).

21

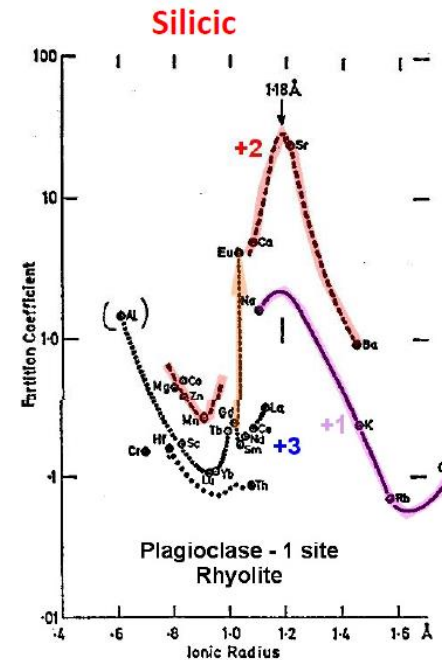


Fig. 10. Plagioclase/matrix. Pumice, Tualo, Oregon, U.S.A., data of DUDAS *et al.* (1971). Ionic radii of WHITTAKER and MUNTUS (1970). modified from Jensen (1973) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, p2227-2242

22

Το **Πλαγιόκλαστο** έχει ένα μέγιστο k_d , για ακτίνα ιόντος, 1.18 \AA , η οποία καθορίζει και το ιόν που θα κάνει την υποκατάσταση. Όμως, η τιμή του k_d , εξαρτάται από την **σύσταση** του μάγματος.

Κατανομή των ιχνοστοιχείων

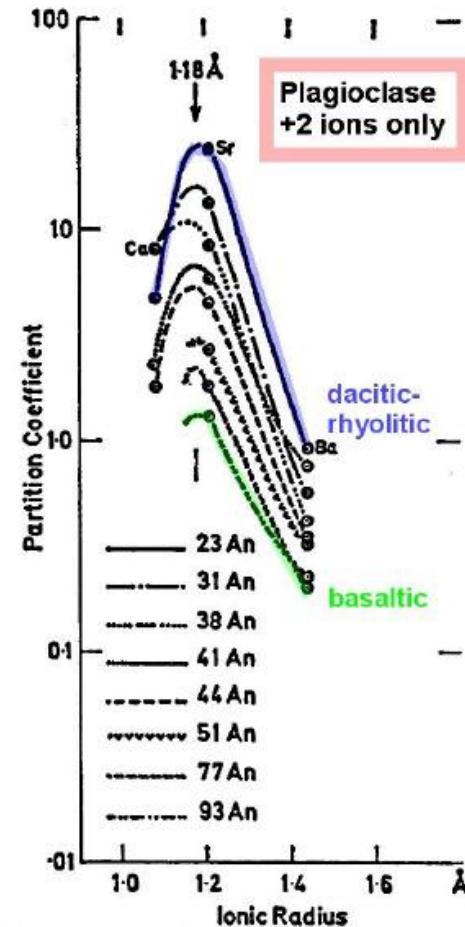
Παράδειγμα, το Πλαγιόκλαστο:

Η σύσταση και η θερμοκρασία της λάβας καθορίζει το ποσοστό ανορθίτη (αριθμός ανορθίτη) στον κρύσταλλο του πλαγιόκλαστου.

Θυμόμαστε...

- An 100 = 100% anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)
- An₀ = 100% albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)
- An50 = ίσο ποσοστό ανορθίτη & αλβίτη

Σημείωση: K_d για το Sr κυμαίνεται από τιμή 5 για βασάλτες έως 50, για τους ρυόλιθους.



23

Fig. 12. Plagioclase/matrix plots of the divalent peak for 8 samples showing relationship between height of the peak and An content of the plagioclase. Data largely from DUDAS *et al.* (1971), EWART and TAYLOR (1969) and PHILIPOTS and SCHNETZLER (1970).
from Jensen (1973)

A) Μαφικές συστάσεις (Βασάλτες-Ανδεσίτες)

TABLE 5.2a. Mineral/matrix partition coefficients of elements in basaltic and andesitic rocks

Henderson, *Inorganic Chemistry*", 1984

	Olivine		Orthopyroxene		Clinopyroxene		Amphibole		Plagioclase		Phlogopite (one determination)	Garnet	
	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average		Range	Average
3 Li					0.26	*	0.12, 0.19	*	0.20	*			
11 Na	0.012-0.024	0.02	0.075	*	0.27	*	0.72, 0.80	*					
12 Mg	4.5-8.0	6.1	4, 7	*	2-5	*	2.8, 4.8	*					
13 Al	0.012	*	0.3	*	0.21-0.6	0.3			1.6-2.1	1.9			
19 K	0.0002-0.008	0.007	0.01, 0.02	*	0.002-0.27	0.03	0.33-0.86	0.60	0.02-0.36	0.17	2.7		
20 Ca	0.01-0.04	0.03	0.2, 0.4	*			1.1, 3.0	*					
21 Sc	0.14-0.22	0.17	1.2	*	1.7-3.2	2.7	2.2, 4.2	*				2.6-5.4	4
22 Ti					0.8	*							
23 V	0.03	*	0.6	*	0.8-1.9	1.3							
24 Cr	1.1-3.1	2.1	10	*	4.7-20	8.4	0.10, 1.6	*				0.06, 0.29	*
25 Mn	0.8-1.8	1.2	1.4	*	0.6-1.3	0.9			0.05	*			
26 Fe ²⁺	1.2-3.0	1.9	1.8	*	0.6-1.0	0.8							
26 Fe ³⁺			0.75	*	0.37-0.86	0.53							
27 Co	2.8-5.2	3.8	2, 4	*	0.7-2.8	1.2	1.4, 1.8	*				0.7-1.8	1.1
28 Ni	8-19	14	5	*	1.4-4.4	2.6							
30 Zn	0.7	*			0.41	*	0.42, 0.69	*					
31 Ga	0.04	*	0.7	*	0.30-0.58	0.40			0.85-1.3	1.0			
37 Rb	0.0002-0.011	0.006	0.02, 0.03	*	0.001-0.28	0.04	0.04-0.4	0.25	0.03-0.50	0.10	3.1		
38 Sr	0.0001-0.02	0.01	0.01, 0.02	*	0.07-0.43	0.14	0.19-1.02	0.57	1.3-2.9	1.8	0.08		
49 In	0.06	*	0.45	*	1.7	*	2.2, 3.1	*					
55 Cs	0.0004	*			0.002-0.018	0.01	0.05, 0.20	*	0.025	*			
56 Ba	0.0001-0.011	0.006	0.012, 0.014	*	0.002-0.39	0.07	0.10-0.44	0.31	0.05-0.59	0.23	1.1		
57 La					0.08	*	0.17-0.44	0.27	0.14	*		0.03, 0.08	*
58 Ce	0.009	*	0.003-0.04	0.02	0.17-0.65	0.34	0.09-0.54	0.34	0.06-0.30	0.14	0.03	0.05	*
60 Nd	0.007, 0.010	*	0.03, 0.06	*	0.32-1.3	0.6	0.19	*	0.02-0.20	0.08	0.03		
62 Sm	0.003-0.015	0.009	0.01-0.10	0.05	0.43-1.8	0.9	0.34-1.46	0.91	0.02-0.20	0.08	0.03	0.07-1.25	0.6
63 Eu	0.006, 0.010	*	0.02, 0.08	*	0.48-2.0	0.9	0.36-1.49	1.01	0.06-0.73	0.32	0.03	0.3-1.5	0.9
64 Gd	0.012	*			0.82, 0.88	*	0.51-1.7	1.1	0.03-0.21	0.10		2.1, 5.2	*
65 Tb			0.05	*	1.0	*	1.02-2.0	1.4	0.03	*		4.1, 7.1	*
66 Dy	0.009, 0.014	*	0.12, 0.29	*	0.56-1.46	1.1	0.64	*	0.01-0.20	0.09	0.03		
67 Ho												13, 24	*
68 Er	0.009, 0.017	*	0.16, 0.46	*	0.53-1.3	1.0	0.48	*	0.02-0.24	0.08			
69 Tm					1.1	*					0.03		
70 Yb			0.11-0.67	0.34	0.48-1.3	1.0	0.46-1.42	0.97	0.006-0.30	0.07		4-53	30
71 Lu			0.11	*	0.67, 1.0	*	0.44-1.31	0.89	0.03-0.24	0.08	0.04	5-57	35
72 Hf												0.3, 0.6	*
82 Pb									0.10-0.67	0.26			
90 Th					0.003-0.05	0.02							
92 U	0.0024, 0.0027	*			0.004-0.08	0.04			0.009	*			

* Where only one or two determinations are available, an average is not given; the values are quoted in the range column.



B) Πυριτικές Συστάσεις

TABLE 5.2b. Mineral/matrix partition coefficients of elements in dacitic and rhyolitic rocks

Henderson, *Inorganic Chemistry*", 1984

	Orthopyroxene		Clinopyroxene		Amphibole		Plagioclase		Alkali Feldspar		Biotite (1 or 2 determinations)	Garnet		Magnetite	
	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average		Range	Average	Range	Average
3 Li	0.16, 0.21	*					0.27-0.66				0.39				
11 Na	0.03-0.1	0.06	0.09-0.14	0.11	0.08	*	1.2-3.1	1.5			0.10				
12 Mg	50-160	100					0.03-0.5	0.3	0.05-0.33	0.21	22				
19 K	0.0006, 0.002	*					0.08-0.33	0.19	0.64-2.2	1.4	2.6, 5.6	0.02	*		
20 Ca	0.55-2.3	1.4	8-12	10	1.8	*	1.8-4.9	3.4	0.10-3.8	1.9	0.62			0.3-0.5	0.4
21 Sc	6.0-7.7	6.9	18-28	22	20	*	0.01-0.20	0.07			11.3	10.2-20.2	16.0	3.3-4.5	3.9
23 V	4.4-10	6													
24 Cr	0.6-3	1.6	90	*			0.03-0.7	0.2			19			5-20	11
25 Mn	20, 24	*					0.02-0.21	0.18	0.01-0.52	0.18	6.0				
27 Co	2.1-3.6	2.9	6.0-11	8	4.5	*	0.04-0.5	0.15			29	1.7-3.6	2.6	19-35	28
30 Zn	0.8-1.0	0.9			7		0.20-0.60	0.38			20			10-14	12
37 Rb	0.0005-0.29	0.09	0.09	*			0.02-0.46	0.09	0.11-0.80	0.38	3.3, 3.5	0.009	*		
38 Sr	0.009, 0.05	*					1.5-8.8	6†	3.6-26	9.4	0.12, 0.36	0.02	*		
39 Y	0.9	*													
49 In											3.9				
55 Cs	0.3						0.01-0.13	0.05			2.4				
56 Ba	0.003-0.03	0.02	0.02, 0.06	*	0.035	*	0.30-0.92	0.50	2.7-12.9	6.6	6.4, 8.7	0.017	*	0.05-0.08	0.07
57 La	0.50-0.90	0.65	0.5-0.8	0.6	0.85	*	0.24-0.49	0.32			0.32	0.28-0.54	0.39	0.24-0.88	0.53
58 Ce	0.08-1.03	0.46	0.6-1.2	0.9	0.43-1.8	1.2	0.11-0.40	0.24	0.04	*	0.04, 0.38	0.35-0.93	0.62	0.28-1.15	0.61
60 Nd	0.11-1.20	0.62	1.4-2.9	2.1	1.0-4.3	3.2	0.06-0.29	0.19	0.03	*	0.04	0.53-0.73	0.63	0.35-1.80	0.88
62 Sm	0.13-1.6	0.7	2.1-3.3	2.7	1.6-8.2	5.4	0.05-0.22	0.13	0.02	*	0.06, 0.39	0.76-5.5	2.2	0.39-1.85	0.93
63 Eu	0.11-1.0	0.5	1.6-2.3	1.9	1.2-5.9	3.6	0.82-4.2	2.0	1.13	*	0.15, 0.33	0.17-1.37	0.7	0.28-0.96	0.58
64 Gd	0.17-2.2	1.1	2.0-4.8	3.1			0.11-0.24	0.16			0.08, 0.44	5.3-13.6	7.7		
65 Tb	0.8-1.6	1.2	2.0-4.1	3.0	3.0	*	0.10-0.22	0.15			0.39	7.2-19.6	12	0.36-1.50	0.84
56 Dy	0.26-1.3	0.7	2.2-4.0	3.3	2.3-14	9	0.04-0.45	0.13	0.006	*	0.10	29	*	0.3-1.4	0.8
67 Ho												18.4-35	28		
68 Er	0.43-0.73	0.61			2.4-11	8	0.03-0.08	0.05	0.006	*	0.16	43	*		
69 Tm	0.8-1.9	1.4			5	*	0.1-0.2	0.1						0.5-1.2	0.8
70 Yb	0.73-1.2	1.0	1.6-2.8	2.1	1.9-9	6.2	0.02-0.30	0.08	0.012	*	0.18, 0.67	26-67	43	0.2-0.6	0.4
71 Lu	0.76-1.4	1.1	2.0-2.6	2.3	1.8-6	4.5	0.03-0.11	0.06			0.74	24-64	38	0.2-0.6	0.4
72 Hf	0.04, 0.2	*	0.20-0.55	0.34	6	*	0.02-0.17	0.07			2.10			0.2-0.6	0.3
73 Ta	0.2-0.7	0.5	0.1-0.8	0.4	0.3	*	0.02-0.09	0.05						0.8-1.8	1.3
82 Pb							0.29-0.78	0.45	0.84-1.4	1.0					
90 Th	0.13-0.18	0.15	0.01-0.25	0.13	0.22	*	0.01-0.09	0.04			0.31			0.04-0.20	0.11
92 U	0.09	*	0.03	*	0.40	*	0.01-0.07	0.03						0.14	*

25



Κατανομή Ιχνοστοιχείων Ανταγωνιστικά – Μη Ανταγωνιστικά

Table 9-1. Partition Coefficients (C_S/C_L) for Some Commonly Used Trace Elements in Basaltic and Andesitic Rocks

	Olivine	Opx	Cpx	Garnet	Plag	Amph	Magnetite
Rb	0.010	0.022	0.031	0.042	0.071	0.29	
Sr	0.014	0.040	0.060	0.012	1.830	0.46	
Ba	0.010	0.013	0.026	0.023	0.23	0.42	
Ni	14	5	7	0.955	0.01	6.8	29
Cr	0.70	10	34	1.345	0.01	2.00	7.4
La	0.007	0.03	0.056	0.001	0.148	0.544	2
Ce	0.006	0.02	0.092	0.007	0.082	0.843	2
Nd	0.006	0.03	0.230	0.026	0.055	1.340	2
Sm	0.007	0.05	0.445	0.102	0.039	1.804	1
Eu	0.007	0.05	0.474	0.243	0.1/1.5*	1.557	1
Dy	0.013	0.15	0.582	1.940	0.023	2.024	1
Er	0.026	0.23	0.583	4.700	0.020	1.740	1.5
Yb	0.049	0.34	0.542	6.167	0.023	1.642	1.4
Lu	0.045	0.42	0.506	6.950	0.019	1.563	

Data from Rollinson (1993).

* Eu^{3+}/Eu^{2+} *Italics* are estimated

26



Κατανομή των ιχνοστοιχείων

- Ταξινόμηση ιχνοστοιχείων με βάση τη γεωχημική τους συμπεριφορά:

I. Ανάλογα με αν προτιμούν τη στερεά φάση ή το τήγμα:

α) **ανταγωνιστικά ($D > 1$)** → κρυσταλλικές φάσεις

β) **μη ανταγωνιστικά ($D < 1$)** → τήγμα

II. Με βάση το λόγο φορτίου/ιοντικής ακτίνας (z/r)

α) **Υψηλού δυναμικού πεδίου (High Field Strength): $z/r > 2$**

β) **Χαμηλού δυναμικού πεδίου (Low Field Strength, ή Large Ion Lithophile Elements - LILE): $z/r < 2$**



Περιοδικός Πίνακας- Γεωχημική Θεώρηση

LILE (μικρό σθένος / μεγάλη ακτίνα)

V · T · E

Goldschmidt classification in the periodic table

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓ Period +1																		
1	1 H	+2																2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg	+3	+4	+5								13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
* Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
** Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

Legend: Lithophile Siderophile Chalcophile Atmosphile Synthetic

27



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ:

Υπολογισμός του συντελεστή κατανομής ενός στοιχείου σε ένα μαγματικό σύστημα.

- Ολικός συντελεστής κατανομής “**bulk Kd**”, ή **D**.
- Ας υπολογίσουμε **D** για το **Rb** και το **Co**, ενός βασάλτη που έχει σύσταση: 45% olivine, 35% orx and 20% cpx
- τήξη στον ανώτερο μανδύα
- Χρησιμοποιώντας δεδομένα από ένα Πίνακα δεδομένων
- $D = k^{ol/l} \cdot x^{ol} + k^{orx/l} \cdot x^{orx} + k^{cpx/l} \cdot x^{cpx} \dots\dots\dots$



Υπολογισμός:

	Kd ol	Kd opx	Kd cpx	Bulk Kd or D
Rb	0,006	0,03	0,14	$0,45*0,006 + 0,35*0,03 + 0,2*0,04 = \mathbf{0.021}$
Co	3,8	3	1,2	$0,45*3,8 + 0,35*3 + 0,2*1,2 = \mathbf{3,0}$

Συμπέρασμα:

για το σύστημα που μελετάμε

Rb $D < 0.01 \Rightarrow$ **μη-ανταγωνιστικό (incompatible)**

Co $D > 1 \Rightarrow$ **ανταγωνιστικό (compatible)**



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Χριστίνα Στουραϊτή 2015. Χριστίνα Στουραϊτή. «Γεωχημεία. Γεωχημικές διεργασίες στο εσωτερικό της γης». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/GEOL2/>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/6)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες

Εικόνα 1: Schematic diagram showing divergent and convergent plate boundaries. Copyright Richardson and McSween, Geochemistry. Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή: www.soest.hawaii.edu.

Εικόνα 2: Global rates of Cenozoic magmatism. Copyright Wilson, “igneous petrogenesis”. Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή: www.soest.hawaii.edu

Εικόνα 3: Schematic diagram showing divergent and convergent plate boundaries. Copyright Richardson and McSween, Geochemistry. Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή: www.soest.hawaii.edu.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/6)

Εικόνα 4: Surface Elevations. Copyright Taylor and McClenmab, Sci. Amer. 1996.
Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή:
www.soest.hawaii.edu.

Εικόνα 5: Surface Elevations. Copyright Taylor and McClenmab, Sci. Amer. 1996.
Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή:
www.soest.hawaii.edu.

Εικόνα 6: Surface Elevations. Copyright Taylor and McClenmab, Sci. Amer. 1996.
Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή:
www.soest.hawaii.edu.

Εικόνα 7: Frequency Distribution of Major Oxides Except Silica. Copyright
Richardson and Sneesby, Mineralog. Mag. 19, 309, 1922. Σύνδεσμος:
<http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή:
www.soest.hawaii.edu.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/6)

Εικόνα 8: Surface Elevations. Copyright Taylor and McClenmab, Sci. Amer. 1996.
Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή:
www.soest.hawaii.edu.

Εικόνα 9: Approximate mineralogical composition of the commoner types of igneous rocks. Copyright University of HAWAII, SOEST. Σύνδεσμος:
<http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή:
www.soest.hawaii.edu.

Εικόνα 10: Nomenclature of normal igneous rocks. Copyright Taylor and McClenmab, Sci. Amer. 1996. Σύνδεσμος:
<http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή:
www.soest.hawaii.edu.

Εικόνα 11: Copyrighted

Εικόνα 12: Copyrighted



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (4/6)

Εικόνα 13: Copyrighted

Εικόνα 14: Chemical Compositions of Some Common Igneous Rocks. Copyright University of HAWAII, SOEST. Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή: www.soest.hawaii.edu.

Εικόνα 15: Harker variation diagrams. Copyright University of HAWAII, SOEST. Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή: www.soest.hawaii.edu.

Εικόνα 16: Phase diagram for the system fosterite-fayalite. Copyright University of HAWAII, SOEST. Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή: www.soest.hawaii.edu.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (5/6)

Εικόνα 17: Harker variation diagrams. Copyright University of HAWAII, SOEST. Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή: www.soest.hawaii.edu.

Εικόνα 18: Ionic Charge-Ionic Radius diagram. Copyright University of HAWAII, SOEST. Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή: www.soest.hawaii.edu.

Εικόνα 19: Pyroxenes. Copyright Slideshare. Σύνδεσμος: <http://www.slideshare.net/joqwerty/pyroxenes-pdf>. Πηγή: www.slideshare.net.

Εικόνα 20: Copyrighted

Εικόνα 21: Copyrighted

Εικόνα 22: Copyrighted

Εικόνα 23: Copyrighted



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (6/6)

Εικόνα 24: Copyrighted. Πηγή: Henderson, Inorganic Chemistry, 1984.

Εικόνα 25: Copyrighted. Πηγή: Henderson, Inorganic Chemistry, 1984.

Εικόνα 26: Copyrighted.

Εικόνα 27: Περιοδικός πίνακας. Copyrighted.

