

İZ VE NADİR TOPRAK ELEMENTLERİN K-FELDSPATLAR İLE MAGMA ERGİYİĞİ ARASINDA DAĞILIMI

PARTITIONING OF TRACE AND RARE EARTH ELEMENTS BETWEEN K-FELDSPARS AND MELT

Mehmet KESKİN

İ. Ü., Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
34850 Avcılar/İstanbul

ÖZ: Elementlerin mineral-ergiyik dağılım katsayıları (K_d), jeokimya ve petroloji konulu çalışmalarda büyük öneme sahiptir. Çeşitli minerallerin K_d değerleri özellikle petrolojik modellerin vazgeçilmez bileşenleridir. K-feldspatlar magma evrimi boyunca kristalenen önemli minerallerden biridir ve kimyasal bileşimleri, magma'nın evrimine ait bazı önemli bilgileri kaydetme potansiyeline sahiptir. Bunlardan sanidin ve anortoklas, ortaç, asitik, bazı alkali bazik ve silikata doyumsuz volkanitlerde sık rastlanan alkali feldspatlar olmaları nedeniyle bu tür volkanik kayalar üzerinde çalışan araştırmacılar için büyük önem taşımaktadır. Literatürde alkali feldspatların K_d değerleri konusunda çalışmalar ve veriler olmasına rağmen, bunların farklı bileşimde magmalar için hangi değerler arasında değiştikleri, P/T gibi değişkenlerle nasıl bir ilişki gösterdikleri konusunda bilgi oldukça azdır. Bu eksikliği gidermek amacıyla literatürde 17 makaleden derlenen 16 elementin K_d değerleri kullanılarak önce bir veri tabanı oluşturulmuş ve ardından bu veriler istatistik yöntemle değerlendirilerek çeşitli SiO_2 bileşiminde magmalar için en uygun K_d değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar, bir tablo şeklinde düzenlenerek volkanik petroloji konusunda çalışan araştırmacıların kullanımına sunulmaktadır.

Tabloda sunulan K_d değerleri ayrıca, KD Anadolu'daki Erzurum-Kars Platosu'nun çarpışma kökenli volkanitlerinin fraksiyonel kristallenme evriminin modellenmesinde kullanılmaktadırlar.

Anahtar Kelimeler: Alkali feldspat, dağılım katsayıları, iz ve nadir toprak elementler.

ABSTRACT: Mineral/melt partition coefficients of elements (K_d s) are of great importance in geochemistry and petrology. K_d values of various minerals are crucial elements for the petrologic modellings. K-feldspars are among the most important minerals crystallising during magmatic evolution of a volcanic suite and their chemistry has a potential of recording some important data concerning magma evolution. Among alkali-feldspars, sanidine and anorthoclase are the most abundant minerals in especially intermediate, felsic, some alkaline-basic and silica-undersaturated volcanic rocks and hence are of great importance for the researchers who study on these rocks. Although there are some studies and data on the K_d values of K-feldspars in the literature, the extent to which these values vary with the composition of magma and P/T conditions is not well established. In this paper, K_d data of 16 elements for K-feldspars were compiled from a total of 17 papers to construct a table of recommended partition coefficient values. Then, these values were statistically evaluated to determine the most appropriate K_d values for magmas having various SiO_2 concentrations. The results are presented in a table for researchers working in the field of petrology. Then these values were used in a FC modelling for collision-related volcanic rocks of the Erzurum-Kars Plateau.

Key words: alkali feldspar, partition coefficient, trace and rare earth elements.

GİRİŞ

Dağılım katsayıları (partition coefficients), bir magmadan kristalenen mineraller ile o minerallerin içinde oluştukları magma ergiyiği arasında elementlerin dağılımlarını oransal olarak gösteren katsayılardır. Magma ergiyiği içeren bir sistemde elementler katı ve sıvı fazlar arasındaki kimyasal aktivitelerine göre o fazlara katılırlar; diğer bir deyişle bölümlenirler (partitioned). Magmadan kristalenen bir mineral içindeki elementlerin katı

ve sıvı fazlar arasında bölümlenmesinin derecesi, *dağılım katsayısı* denilen basit bir oran ile tanımlanır:

$$K_d = \frac{C_{\text{mineral}}^{\text{elementi}}}{C_{\text{elementi}}^{\text{mineral}}}$$

Burada:

K_d : bir elementin dağılım katsayısı, $C_{\text{elementi}}^{\text{mineral}}$: bir elementin bir mineral içindeki konsantrasyonu (ppm cinsinden),

K_d : aynı elementin magma içindeki konsantrasyonu (ppm cinsinden).

Dağılım katsayıları (K_d), ancak kristal fazı ile ergiyik arasında kimyasal dengenin (equilibrium) olması durumunda geçerlidir. Herhangi bir volkanik kaya topluluğu için bu dengenin gerçekten olup olmadığı ise petrografi ve duraylı izotop çalışmaları ile test edilebilir. Petrografik çalışmalarda fenokristallerde reaksiyon kenarlarının ve korozyonun bulunması ve birbirleriyle uyumsuz mineralojik/kimyasal bileşimde minerallerin birlikteliği, dengesizliğin (disequilibrium) kanıtlarıdır.

Dağılım katsayıları, pek çok petroloji ve jeokimya çalışmalarının başlangıç noktasını ve temelini oluştururlar. Magmatik petroloji konusunda gerek kısmi ergime (partial melting) ve özümleme (assimilasyon) gibi katı fazdan sıvı faza, gerek fraksiyonel kristallenme gibi sıvı fazdan katı faza dönüşümlerde ve gerekse özümleme ile eş zamanlı fraksiyonel kristallenme (AFC: Assimilation combined with Fractional Crystallisation) gibi her iki fazın birbirine dönüşümünün birlikte olduğu kompozit sistemlerde elementlerin davranışının incelenmesinde ve petrolojik modellemesinde kullanılırlar.

Elementlerin, mineraller ile dengede oldukları magma ergiyiği (melt) arasında dağılımını dikkate almaksızın yapılan petroloji ve jeokimya çalışmaları, pek çok hatalara ve yanlış yorumlara yol açabilirler ve açmaktadır da. Bir magmatik provensten alınan numunelerin jeokimyasal bileşimlerinin, elementlerin mineral/sıvı arasındaki dağılımları hesaba katılmaksızın, sadece klasikleşmiş bir dizi sınıflama ve ayırtlama (discrimination) diyagramlarına izdüşürülerek yapılan çalışmalar, günümüzde popülerliklerini olmasa da, geçerliliklerini büyük ölçüde yitirmişlerdir. Bu tür çalışmalar, bir jeokimya çalışmasının sadece tanımsal (descriptive) ilk basamağını oluşturmalıdır. Bu ilk basamağı, elementlerin katı ve sıvı fazlar arasında farklı fiziko-kimyasal koşullar altında davranışlarını hesaba katan kökene yönelik çalışmaların yani "petrolojik modellemeler" izlemelidir. Jeokimyanın çeşitli konularında son yıllarda yayınlanan uluslararası makalelerin çoğunda petrolojik modellemelere rastlamaktayız (Taylor, 1980; DePaolo, 1981; James, 1982; Powel, 1984; Davidson vd., 1988 ve 1990; Pearce vd., 1990; Güleç, 1991; Aitchison ve Forrest, 1993; Keskin, vd., 1998b). Bu modellemelerin vazgeçilmez ögesi ise dağılım katsayılarıdır.

Türkçe literatürde dağılım katsayıları konusunda birkaç kitapta yer alan kısa tanımlamalar dışında ne yazık ki kaynak bulunmamaktadır. Bu konuda yabancı literatürde pek çok makale olmasına karşılık sözkonusu katsayıların bazikten asite kadar bütün magma bileşimini kapsayacak bir ölçekte değerlendirmesi yapılmamıştır ve bu katsayıların ortamın kimyası ve fiziksel koşulları tarafından hangi ölçüde denetlendikleri sorununun pek azı çözülebilmektedir. Bu konuda yapılmış olan çalışmalar, yazarların çoğunlukla dar bir bileşim aralığı için K_d so-

nuçlarını içermekte olup, bu sonuçların sizin özel probleminize uygun olup olmadığı çoğunlukla bilinmemektedir. Bu nedenle, yabancı yazarların jeokimya kitaplarında tablolar şeklinde verilen dağılım katsayıları bile, ashında minerallerin içinde oluştukları fiziko-kimyasal koşulları dikkate almayan yaklaşık değerlerdir ve büyük olasılıkla da sizin probleminize cevap vermekten uzaktırlar.

Bu makalenin amacı, (1) dağılım katsayılarının petroloji ve jeokimya çalışmalarındaki önemini vurgulayarak, (2) alkali feldspat mineral jeokimyası konusunda yayınlanmış çalışmalarda K_d değerlerini, bu değerlerin saptandığı ortamların fiziko-kimyasal koşulları ile birlikte derleyerek bir veri tabanı oluşturmak ve bu verileri istatistik yöntemlerle değerlendirerek volkanik kayalarda ana, iz ve nadir toprak elementlerin (NTE) alkali feldspat ile magma eriyiği arasında dağılımlarını incelemek, (3) alkali feldspat dağılım katsayılarının magmanın kimyası ve fiziksel koşulları gibi değişkenlerle ilişkisini araştırmak; bu değişkenlerin bağlı önemlerini tartışmak ve (4) istatistik değerlendirme sonucunda bir K-feldspat/ergiyik K_d tablosu oluşturularak jeokimya ve petroloji konusunda çalışan araştırmacıların kullanımına sunmaktır.

K_d VERİ TABANI

Alkali feldspat K_d değerleri, volkanik kayalardaki K-feldspatları konu alan 17 ayrı çalışmadan derlenmiştir (Tablo 1). Söz konusu makaleler, K-feldspat K_d değerleri konusunda şimdiye kadar yayınlanan çalışmaların büyük çoğunluğunu içermektedir. Derleme sırasında oluşturulan veri tabanında sadece K_d değerlerini tespit etmeye yönelik çalışmaların sonuçları kullanılmıştır. Sun ve Hanson (1976), Mahood ve Stimac (1990) ve Keskin'in (1994) anortoklas mineraline ait K_d sonuçları içeren çalışmaları dışında bütün makaleler sanidin mineralini konu almaktadır. Makalelerden yalnızca Guo ve Green'in (1989) çalışması deneyseldir, diğerleri doğal kaya örneklerindeki mineral-matriks çiftlerinin ayrı ayrı analizleri ile elde edilmiştir.

Veri tabanında toplam 89 K_d sonucu bulunmaktadır. Bunlardan 5 adedi anortoklas mineraline diğerleri ise sanidine aittir. Veri tabanında toplam 16 iz ve Nadir Toprak Elementi (NTE) vardır. Volkanik ana kayaların (host rock) bileşimleri fonolit'ten (Sun ve Hanson, 1976; Wörner vd., 1983) pantellerit'e (Mahood ve Stimac, 1990), alkali bazaltlardan (Philpotts ve Schnetzler, 1970; Villemant vd., 1981) trakit (Nagasawa, 1971 ve 1973; Lemarchand vd., 1987; Mahood ve Stimac, 1990), riyolit (Leeman ve Phelps, 1981; Stix ve Gorton, 1990; Keskin, 1994) ve yüksek silisyumlu riyolit'e (Mahood ve Hildreth, 1983) kadar uzanan tüm SiO_2 spektrumunu kapsar (Tablo 1). Çalışmalar arasında sadece Stix ve Gorton'un (1990) kristallenme sıcaklığı verisi vardır.

Guo ve Green'in (1989) deneysel çalışmasında ise, deney koşulları denetlendiği için, sıcaklık ve basınç değerlerinin her ikisi de verilmektedir. Söz konusu veri tabanı, çok yer kaplayarak makaleyi gereksiz yere uzatacağı için bu makalede verilmemiştir.

Table 1 : K-feldspat K_d değerlerinin derlendiği kaynaklar.

Table 1 : Source of K_d data evaluated in this paper.

SANIDIN	
Doğal materyal	
1	Philpotts ve Schnetzler (1970)
2	Nagasawa (1971)
3	Nagasawa (1973)
4	Arth (1976)
5	Hildreth (1977)
6	Cox vd. (1979)
7	Leeman ve Phelps (1981)
8	Villemant vd. (1981)
9	Mahood ve Hildreth (1983)
10	Wörner vd. (1983)
11	Nash ve Crecraft (1985)
12	Lemarchand vd. (1987)
13	Mahood ve Stimac (1990)
14	Stix ve Gorton (1990)
Deneysel	
15	Guo ve Green (1989)
ANORTOKLAS	
16	Sun ve Hanson (1976)
13	Mahood ve Stimac (1990)
17	Keskin (1994)

K_d DEĞERLERİNİN HESAPLANMASINDA KULLANILAN YÖNTEMLER VE HATALARIN KAYNAĞI

Mineral-matriks çiftlerinden elde edilen K_d değerleri için başlıca iki farklı yöntem izlenmektedir. Bunlardan birincisinde doğal kaya numuneleri mekanik yöntemlerle kırılır ve içerdikleri K-feldspat ve matriks binküler mikroskop altında el veya fiziksel ayırma yöntemlerinden biri ile toplanır. Bunlar gerekli numune hazırlama işlemlerinden sonra XRF, INAA (Instrumental Neutron Activation) veya ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) gibi yöntemlerden biri ile analiz edilirler. İkinci yöntemde ise mineraller, Elektron Mikro-Prob, İyon Prob, Proton Prob veya Laser Ablation gibi ışın huzmesi içeren analitik aygıtlarla yerinde (in situ) analiz edilmektedirler.

Deneysel çalışmalarda doğal veya sentetik materyaller P/T ve O fugasitesi ve diğer koşulları denetlenen bir ortamda kristallenmeye bırakılırlar. Deney her seferinde koşulların değiştirilmesi ile tekrar edilir. Elde edilen kristaller ve matriks yukarıda tanımlanan ayıklama veya in situ yöntemlerden biri ile analiz edilir ve K_d değerleri saptanır. Deneysel tekniklerin fenokristal-matriks

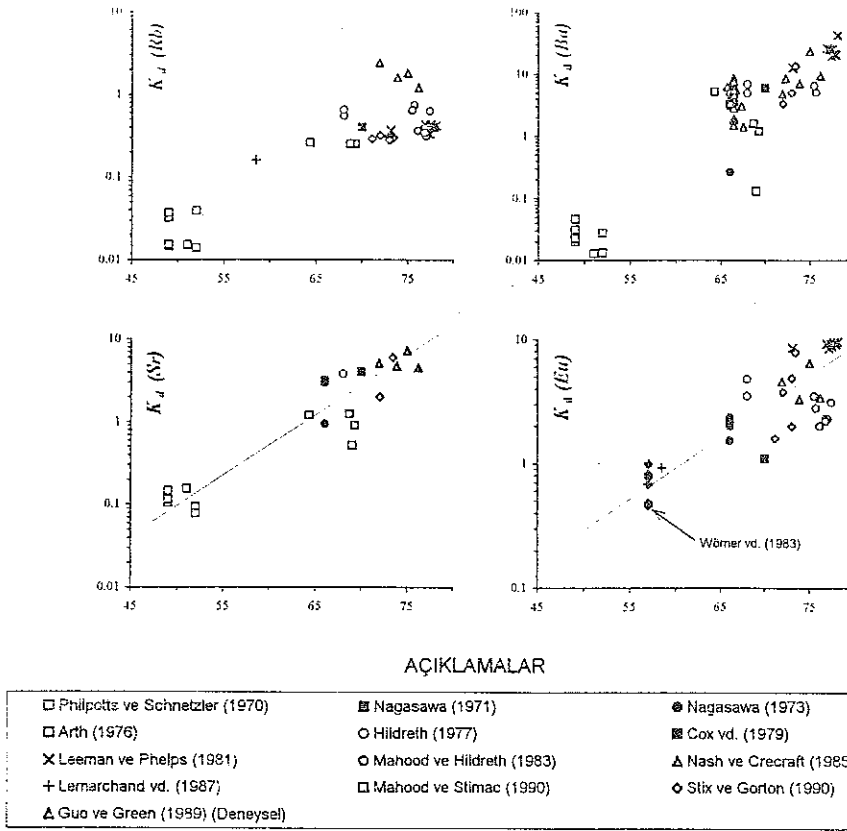
yöntemine göre avantajı, K_d değerlerinin fiziko-kimyasal koşullarla olan ilişkisi ve kristallerin yapılarına bağlı olarak iz element davranışlarındaki değişikliklerin kantitatif olarak değerlendirilebilir olmasıdır (Irwing, 1978). Deneysel yöntemin de bazı eksiklikleri vardır. Bunlardan en önemlisi, laboratuvar ortamında yaratılan deney sisteminin karmaşık doğal sistemleri tam anlamıyla simüle edemeyeceği gerçeğidir.

Doğal sistemler, birbirlerine bağlı veya bağımsız pek çok değişkenin etkin olabileceği karmaşık sistemlerdir. Bu nedenle doğal sistemlerde oluşmuş kayalardaki mineral-matriks çiftlerinden elde edilen K_d değerlerinde analitik hata dışında, hataya neden olabilecek diğer bir dizi faktör de söz konusudur. Kristal büyümesi sırasında magma ile kristaller arasında ortaya çıkabilen dengesizlik (Pearce ve Norry, 1979) veya özellikle bazı Nadir Toprak Elementlerce (NTE) zenginleşmiş, mikroskopla görülemeyecek kadar küçük aksesuar mineral kapanımlarının varlığı (Mahood ve Hildreth, 1983) K_d değerlerinde kuvvetli dalgalanmalara neden olabilir. Laboratuvar ortamında mineral ayıklaması sırasında mineral ve matriks fazlarının birbirlerinden yeterince iyi ayrılmaması da hatalara kaynaklık eder. Bunun dışında K_d değerleri, P/T, magmanın kimyasal bileşimi ve O fugasitesi gibi değişkenlere bağlı olarak büyük değişimler gösterirler. Ancak bir volkanik istiftenden derlenen volkanik numunelerde minerallerin kristallenme koşullarını (paleo-termo ve barometre formülasyonlarındaki bütün gelişmelere karşı) hassaslıkla saptamak da pek çok durumlarda mümkün olamamaktadır. Bu nedenle hesaplanan K_d değerleri ile fiziko-kimyasal parametreler arasında gerçekte varolan ilişkiyi saptamak çoğu durumlarda zordur ve hatta olanaksızdır.

K_d DEĞERLERİNİN İSTATİSTİK DEĞERLENDİRİLMESİ

Yukarıda kısaca değinildiği gibi minerallerin K_d değerleri, o minerallerin kristallendiği ortamdaki P/T, O fugasitesi ve ergiyiğin kimyasal bileşimi ile sıkı bir ilişki gösterirler. Bu parametrelerin bağlı önemleri, fiziko-kimyasal koşullardaki farklılıklara bağlı olarak bir sistemden diğerine ve hatta aynı sistem içinde zamana bağlı olarak değişebilmektedir. Veri tabanını oluşturmada yararlanılan makalelerin çoğunda ne yazık ki P/T ve O fugasitesi değerleri verilmemiştir ve bu nedenle söz konusu değişkenlerin bağlı önemlerini ve birbirleri ile ilişkilerini istatistik ve matematiksel olarak saptamak ve bu ilişkilerin derecesini tartışmak mümkün değildir. Geriye sadece ergiyiğin kimyası kalmaktadır.

Birçok yazar, magma ergiyiğinin SiO_2 içeriğini K_d değerlerini denetleyen parametrelerden en önemlisi saymaktadır. Pearce ve Norry (1979) Ti, Zr, Y ve Nb elementleri için yapmış oldukları K_d derlemesinde (compilation) magma ergiyiğinin SiO_2 değerini esas parametre



Şekil 1. Alkali feldspatlarda Rb, Ba, Sr ve Eu K_d değerlerinin magma ergiyiğini temsil eden matriksin SiO_2 değeri ile korelasyonu.

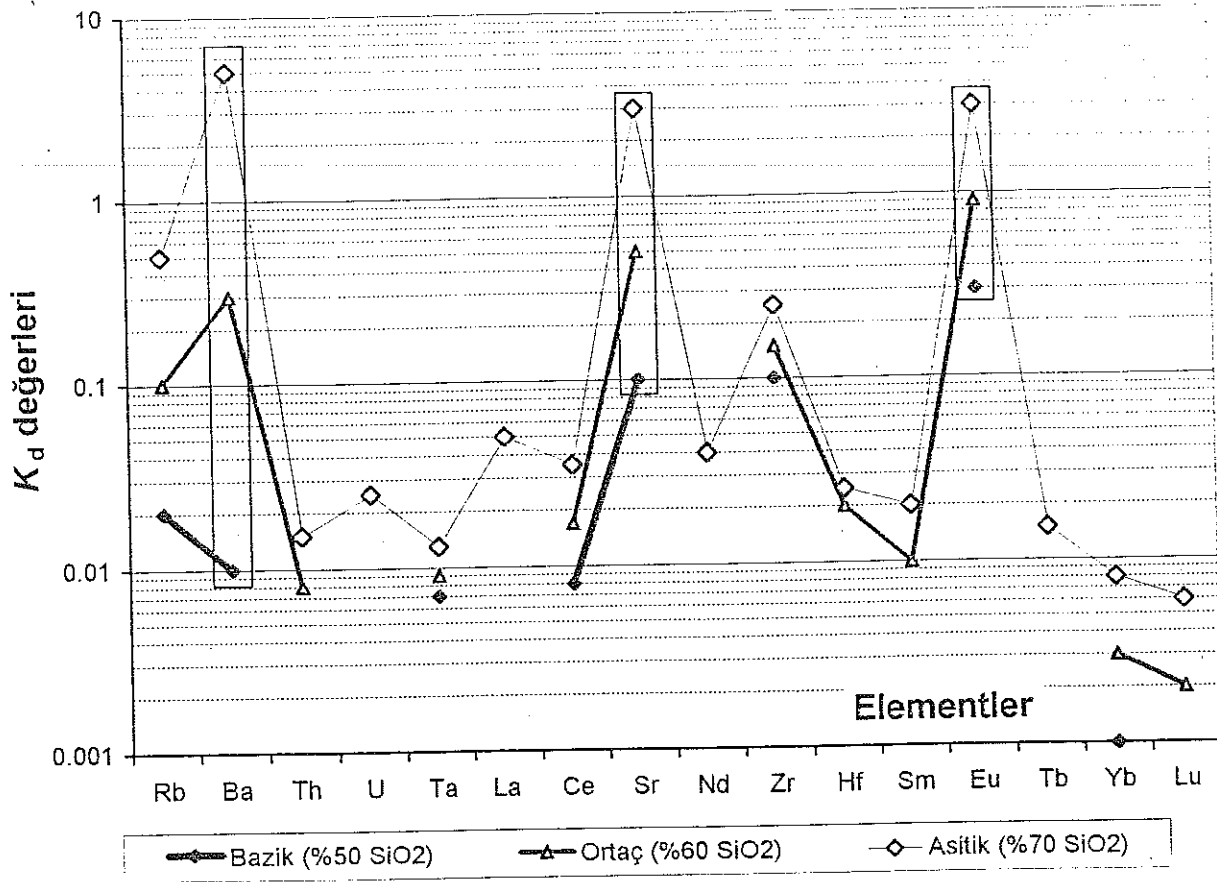
Figure 1. Correlation of K_d vales of Rb, Ba, Sr and Eu in alkali feldspars with SiO_2 values of their matrix.

olarak kullanmışlardır. Watson (1976) ve Ryerson ve Hess (1978) çalışmalarında, SiO_2 'nin diğer değişkenlerle (P/T) de iyi bir korelasyon gösterdiğini kanıtlamışlardır. Mahood ve Hildreth (1983) da silisyumca zengin magmalarda bileşimsel etkilerin birincil, sıcaklık etkisinin ise ikincil önemde olduklarını kabul etmektedir. Bilindiği gibi SiO_2 , magma ergiyiğinin evrimleşme derecesini gösteren önemli bir parametredir ve dolayısıyla birçok magmatik sistemde ayrışma indeksi (FI: Fractionation Index) olarak kullanılır.

K_d değerlerinin SiO_2 ile korelasyonunu inceleyebilmek amacıyla K-feldspatlara ait veri tabanındaki 16 elementin her birine ait K_d değeri, içinden mineral numunesinin ayıklanmış olduğu ana kayanın matriksinin SiO_2 değerine karşı nokta diyagramlarına (scatter diagrams) izdüşürülmüştür. Verilerde matriks SiO_2 değeri bulunmadığı durumlarda ana kayanın SiO_2 değeri matriks olarak kabul edilmiştir. Şekil 1'de bu elementlerin en önemlilerinden Rb, Ba, Sr ve Eu'un magma sıvısının SiO_2 değeri ile ilişkisi görülmektedir. Fazla yer kaplamaları nedeniyle diğer elementler şekle dahil edilmemişlerdir. K_d değerlerinin tümü, magma sıvısının SiO_2 değeri ile pozitif bir korelasyon göstermektedir. Asitik bileşimli magmadan kristallenen K-feldspatlarda bazı

elementlerin K_d değerleri bazık uçtakinin yüzlerce (Sr ve Rb, Eu için) ve hatta binlerce (Ba için) katına ulaşabilmektedir (şek. 1 ve 2). Bu değerlerden bir kısmı esas gidişten (main trend) farklı derecelerde sapma göstermektedirler. Bu sapmaların tahminen küçük bir kısmı kaynak olarak kullanılan makalelerdeki analitik hataya bağlıdır. Saçılmaların büyük kısmı ise K_d değerlerinin sıcaklık, basınç, O aktivitesi gibi makalelerde belirtilmeyen parametrelere bağımlılığı sonucu ortaya çıkmaktadır.

Bu korelasyonun derecesini saptamak ve bazık, ortaç ve asitik volkanik kayalardan her biri için her elementin en uygun dağılım katsayısı değerlerini belirlemek amacıyla en küçük kareler yöntemi (least square method) kullanılmıştır. Her bir elementin K_d değerleri bağımlı değişken (dependent variable), matriks SiO_2 değerleri ise bağımsız değişken (independent variable) olarak kabul edilerek nokta diyagramlarındaki veri noktalarına en uygun doğrular (best-fit line) hesaplanmıştır. Söz konusu lineer regresyon doğrularından yararlanılarak bu 16 iz elementin sırasıyla bazık (%50 SiO_2), ortaç (%60 SiO_2) ve asitik (%70 SiO_2) magma bileşimleri için optimum K_d değerleri belirlenmiştir. Söz konusu değerler Şek. 2'deki örümcek diyagramında azalan uyumsuzluk-



Şekil 2. Bazik, ortaç ve asitik magmalar ile alkali feldspatlar arasında elementlerin dağılım desenini (pattern) gösteren diyagram. K_d değerleri, istatistik olarak saptanmış olan ve Tablo 2'de önerilen değerlerdir. X eksenindeki elementler, solda sağa doğru yani Rb'dan L'a azalan uyumsuzluklarına (incompatibility) göre dizilmişlerdir.

Figure 2. Diagram displaying distribution patterns of the elements between alkali feldspars and magmas of basic, intermediate and acidic composition. K_d values have been determined statistically and given in Table 2 as recommended values. The elements on the horizontal axis are arranged in accordance with their decreasing incompatibility from Rb to Lu.

larına göre sıralanarak gösterilmektedir. Böylece bazalttan riyolite kadar geniş bir spektrumdaki volkanik kayalar için petroloji çalışmalarında kullanılabilir K_d değerlerini elde edilmiş ve tablo formunda Tablo 2'de sunulmuştur. Tablodaki italik değerler, saçılma nedeniyle standart hatanın yüksek olduğu ve bu nedenle yaklaşık olarak kabul edilen değerlerdir.

ÖNERİLEN K_d DEĞERLERİNİN BİR FC MODELLEMESİNDE KULLANIMI

Önerilen alkali feldspat K_d değerleri, Erzurum-Kars Platosu'nun çarpışma kökenli volkanitlerinin fraksiyonel kristallenme evrimini irdeleyen bir Rayleigh fraksiyonel kristallenme (FC) modellemesinde kullanılmış ve Şek. 3'de sunulmuşlardır. Söz konusu platonun volkanostratigrafisi ve temel jeokimyası Keskin (1994), Keskin (1998) ve (Keskin vd. (1998)'de ayrıntılı bir şekilde verilmektedir ve dolayısı ile bu konulara burada tekrar değinilmeyecektir. Şek. 3-a ve -b'deki vektör rozetleri üzerinde görülen her bir vektör, magmadan fraksiyonel

kristallenme (FC) ile belli bir mineralin veya mineral topluluğunun belirli oranda (şekilde % 0'dan % 50'ye kadar) ayrılması sonucunda magma bileşiminin diyagramlar üzerinde hangi yönde ne oranda evrim geçireceği ne tür bir trend (vektör) oluşturacağını teorik olarak göstermektedir. Bu vektörlerin oluşturulmasında kullanılan diğer minerallerin K_d değerleri, Keskin (1994)'den alınmışlardır. Rayleigh FC vektörlerinin teorisi, hesaplanması ve yorumlanması Keskin (1995-1996)'de verilmiştir.

Bir volkanik provensteki numunelerin veri noktalarının oluşturduğu gerçek trendler ile teorik trendleri (vektörleri) karşılaştırarak, volkanizmayı besleyen magma odalarındaki kristallenme evrimi hakkında yaklaşımlarda bulunmak mümkündür. Şek. 3-b'de Ba'un Rb 100 ppm'e ulaşana dek sürekli artması, Erzurum-Kars Platosu'nda alkali feldspatın bu noktaya kadar kristallenmeye katılmadığını göstermektedir. Bu noktadan itibaren, yani magma odaları içindeki FC evrimi taban bimodal seviye içindeki asit lav ve ignimbitler ile platonun en üstündeki felsik domları besleyecek derecede SiO_2 konsantras-

Table 2 : 2. Bazik, ortaç ve asitik magmalar için önerilen K-feldspat K_d değerleri. İtalik olanlar yaklaşık değerlerdir.

Table 2 : 2. Recommended K-feldspat K_d values for mafic, intermediate and acid magmas. Italics are the approximate values evaluated in this paper.

	Bazik (%50 SiO ₂)	Ortaç (%60 SiO ₂)	Asitik (%70 SiO ₂)
Rb	0.02	0.1	0.5
Ba	0.01	0.3	5
Th	-	0.008	0.015
U	-	-	0.025
Ta	0.007	0.009	0.013
La	-	-	0.05
Ce	0.008	0.017	0.035
Sr	0.1	0.5	3
Nd	-	-	0.04
Zr	0.1	0.15	0.25
Hf	-	0.02	0.025
Sm	-	0.01	0.02
Eu	0.3	0.9	3
Tb	-	-	0.015
Yb	0.001	0.003	0.008
Lu	-	0.002	0.006

yonuna ulaştığında, alkali feldspatın FC'ya gitgide egemen olduğunu görmekteyiz; çünkü Ba bu noktadan itibaren hızla düşmektedir. K-feldspatın egemen olduğunun en büyük kanıtı, Şek. 3-b'de plato üzerindeki felsik domlar ve bimodal taban seviyesini oluşturan veri noktalarının oluşturduğu gidışin, asit magma bileşimi için hesaplanmış olan sanidin vektörüne (*Sanidin (A)*) çok iyi paralellik göstermesidir. Bu sırada sodik plajiyoklas da K-feldspata yaygınca eşlik etmiş olmalıdır. Çünkü Şek. 3-a'da görüldüğü gibi alkali feldspata oranla plajiyoklas kristallenmesine daha fazla duyarlı olan Sr'un da aynı Rb değerinden (yaklaşık 100 ppm) itibaren hızla azaldığını ve asit bileşimli magmalar için modellenmiş olan plajiyoklas vektörüne (*Plg (A)*) çok iyi uyum gösterdiğini görmekteyiz.

Burada ilginç olan nokta, alkali feldspat FC'una ilişkin güçlü jeokimyasal kanıtlara rağmen Erzurum-Kars Platosu'nun Bimodal taban seviyesindeki asitik lav ve ignimbritler ile platonun en üstündeki felsik domların büyük çoğunluğunun tamamen camsı-afirik olmaları, feldspat veya başka bir minerale ait fenokristal içermemeleridir. Bunun nedeni, magma odası içindeki diferansiyasyon ve zonlanma ile büyük hacimlerdeki feldspatın, magma sıvısından ayrılmış olmasıdır.

SONUÇLAR

Element/magma dağılım katsayıları (K_d), magmatik petroloji ve jeokimyada bir çok modellenmenin temelini oluşturan değerlerdir. Bu katsayılar, elementlerin katı ve

sıvı fazlar arasındaki bölünmesini gösterirler ve ortamın P/T koşulları, O fugasitesi, kimyasal bileşimi gibi bir dizi değişken ile korelasyon sunarlar. Bu değişkenler arasında SiO₂ değeri, bütün değişkenlerle korelasyon göstermesi açısından en önemli parametredir. Bu çalışmada literatürde alkali feldspat K_d değerleri konusundaki 17 ayrı makaleden toplam 16 iz ve NTE için veri derlenmiş, veriler istatistik yöntem ile değertendirilerek bazik (%50 SiO₂), ortaç (%60 SiO₂) ve asit (%70 SiO₂) magma bileşimleri için en uygun K_d değerleri saptanmıştır. Önerilen sonuçlar bir tablo şeklinde magmatik petroloji konusunda çalışanların kullanımına sunulmuştur. Tabloda sunulan Sr, Ba ve Rb elementleri için K_d değerleri, bir Rayleigh FC vektör modellemesinde kullanılmış ve Erzurum-Kars Platosu volkanizmasının FC evrimine yaklaşımda bulunulmuştur. Modellemeye göre, platonun tabanı ve tavanında bulunan afirik asitik lav ve ignimbritler, magma odası evrimleri sırasında şiddetli bir K-feldspat FC'una sahne olmuşlardır. Gravitatif ayrışma ve magma odası içindeki zonlanma nedeniyle bu kristallerin büyük bölümü magma sıvısından ayrılmış ve sonuçta feldspat kristallenmesi konusunda geriye hemen hiç petrografik kanıt kalmamış olmalıdır.

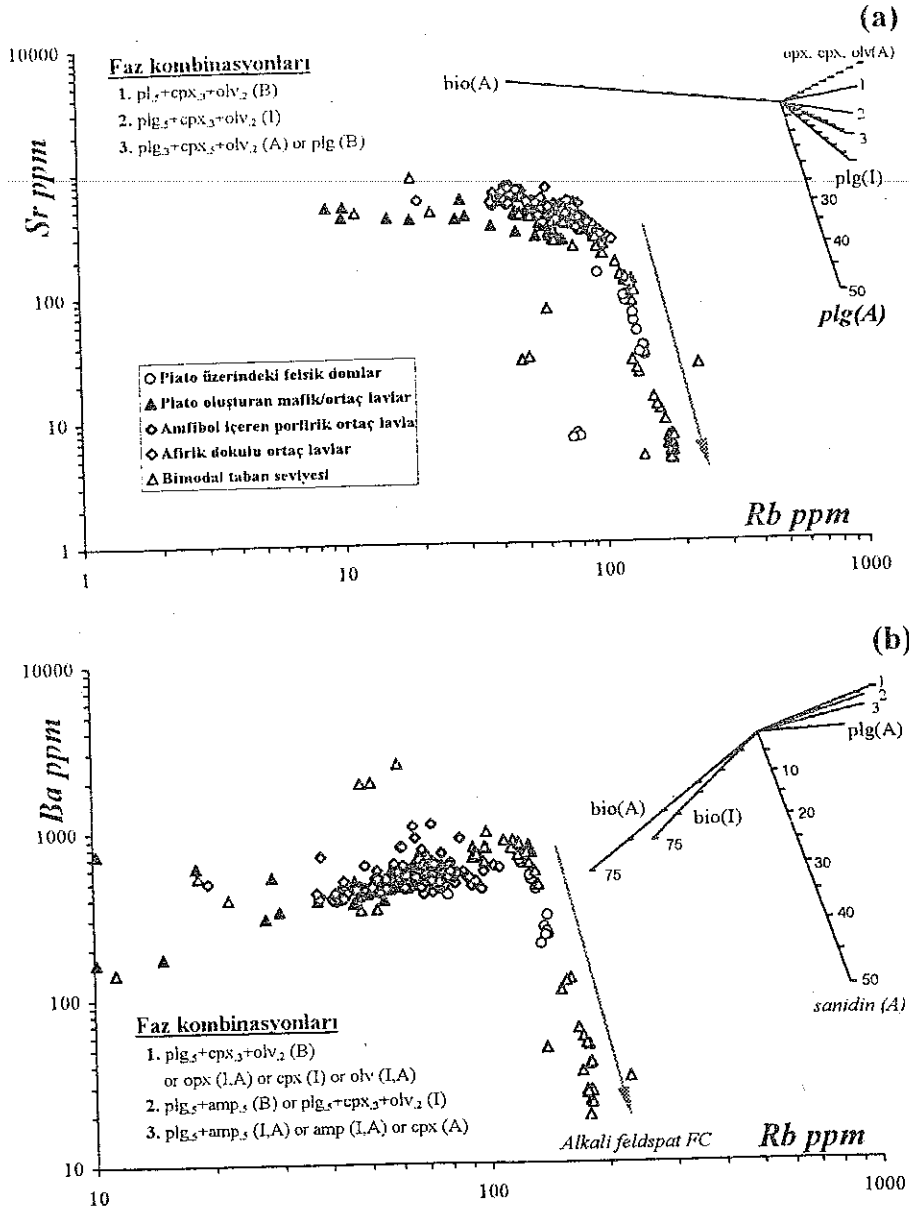
KATKI BELİRTME

Doktora çalışmam sırasında danışmanlığımı yapmış olan Dr. Julian A. PEARCE ve Dr. Dave HIRST'e yapıcı eleştiri ve katkıları için teşekkürlerimi sunarım.

SUMMARY

The extent to which an element is incorporated into a mineral crystallising from magma can be expressed by means of a *partition coefficient*. A partition coefficient is defined as the ratio of concentration of an element in a particular mineral to the concentration of the same element in the matrix representing the melt. Mineral/melt partition coefficients of elements (K_{ds}) are among the most important variables widely used in petrogenetic modellings. The validity of K_{ds} is dependent upon the existence of equilibrium between the phenocryst phases and the melt. Mineral phenocrysts can be examined for the existence of equilibrium or disequilibrium following two main ways; petrographic studies and stable isotopic analyses of minerals.

The value of K_d depends on several variables such as composition, pressure, temperature and oxygen fugacity of the mineral-liquid system, and also on crystal chemistry. Therefore, a single K_d value for a mineral alone is usually meaningless. Partition coefficients ideally should be evaluated as functions of one or a set of these physical and chemical variables, many of which are co-variant in natural systems. In most cases, isolating one of these effects from others is a difficult problem



Şekil 3. ErzurumKars Platosu'nun çarpışma kökeli volkaniklerinde Ba ve Sr'un Rb'a karşı davranışını gösterir log-log diyagramlar. Teorik Rayleigh fraksiyasyon vektörleri diyagramlara birey minerallerin ve ayrıca mineral topluluklarının kristalizasyonunu modelleyecek şekilde izdüşürülmüşlerdir. Her bir vektör için, kristallemesi olası minerallerin % oranları (faz kombinasyonları), diyagramda verilmiştir. Vektörler, %50 kristalizasyon için modellenmişlerdir ve üzerlerindeki çizgiler, %10 kristallenme basamaklarına karşılık gelmektedir.

Diyagram, plato volkanizmasını besleyen magma odalarında fraksiyonel kristallenme evriminin sonlarına doğru alkali feldspat ve plajyoklas kristallenmesinin gitgide daha fazla egemen olduğunu göstermektedir. **Kısaltmalar:** plg: plajyoklas san: sanidin, olv: olivin, bio: biotit, cpx: klinopiroksen. B: bazik, I: ortaç, A: asit bileşimli magma.

Figure 3. Log-log diagram showing behaviour of Ba and Sr against Rb in collision-related lavas of the Erzurum-Kars Plateau. Theoretical Rayleigh fractionation vectors have been modelled for both crystallisation of individual mineral phases and phase assemblages. Percentages of minerals (phase combinations) which are likely to crystallise are given on each diagram. The vectors are designed for 50% crystallisation and short lines on each vector indicate 10% crystallisation intervals.

Diagrams indicate that FC of alkali feldspar associated with plagioclase dominated the FC history in magma chambers that fed the volcanism on the plateau.

Key to abbreviations: plg: plagioclase san: sanidine, olv: olivine, bio: biotite, cpx: clinopyroxene; B: basic I: intermediate, A: acid.

The mineral-melt partition data come from two basically different sources: (1) analyses of phenocryst-matrix pairs of natural rock samples; and (2) synthesis of equilibrium crystalline and melt phases using experimental techniques that are carried out under controlled melt composition, temperature, pressure and oxygen activity conditions followed by their analysis.

Among the papers published to date, most of the data have been obtained by analyses of separated mineral phenocrysts and the matrix, which theoretically represents the magmatic liquid in which these phenocrysts crystallised. Different analytical techniques having different sensitivities including X-Ray, Electron Probe, Instrumental Neutron Activation (INAA) and recently Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS) analysis have been used by the researchers to determine the major and trace element concentrations of these two phases for several rock-forming minerals. In this method, analytical error is only one of the factors affecting the reliability of K_d determinations. Variations in K_d values arise from several factors predominantly as a result of the complexity of natural systems including change in distribution coefficients during crystal growth (Pearce and Norry, 1979), disequilibrium between the minerals and magmatic liquid, and presence of sub microscopic accessory mineral inclusions which are generally strongly enriched in some trace and REE elements. Inefficiency of phase separation also causes errors. One of the weakest aspects of this method is that, it is difficult to determine the crystallisation conditions i.e. temperature, pressure and oxygen activity of the mineral-melt system upon which K_d values are strongly dependent.

K-feldspars are some of the most important minerals crystallising in a volcanic suite. Furthermore, chemistry of these minerals may supply us with some important information concerning magma evolution. Among them, sanidine and anorthoclase are the most abundant minerals in especially intermediate, felsic, some alkaline-basic and silica-undersaturated volcanic rocks. Therefore, these two minerals are quite important for those who study on these rocks.

Although there are some studies and data on the K_d values of K-feldspars in international papers and books, the extent to which these values vary with the composition of magma and P/T conditions is not well established. To my knowledge, in Turkish literature, we have not got any papers on K_d s of K-feldspars except for a few textbooks which give a short description of the concept of partitioning of elements between minerals and melt.

Although the relative importance of the main factors including P/T, Oxygen fugacity and composition varies with respect to the physical/chemical conditions of the system, SiO_2 content of the melt is considered to be the most significant single factor that controls K_d s. It also,

in general, correlates with other factors, as well proven in studies by Watson (1976) and Ryerson and Hess (1978). In their compilation, Pearce and Norry (1979) used SiO_2 content of the melt as the main independent variable to estimate their recommended K_d s for Ti, Zr, Y and Nb. Mahood and Hildreth (1983) also consider compositional effects to be of first importance while temperature effects to be of secondary importance in silicic magmas. The SiO_2 content of the melt is readily available in all of the papers unlike temperature, pressure and oxygen fugacity. Therefore, SiO_2 content of the melt has been selected and used as the main parameter in this study.

In this paper, K_d data of 16 elements for K-feldspars were compiled from a total of 17 papers to construct a table of recommended K_d values for acidic, intermediate and basic volcanic rocks. Only those papers, which have specifically aimed establishing appropriate partition coefficients, have been used for the compilation. Host-rock and, when available, matrix compositions presented in these papers almost completely cover the compositional range of SiO_2 from basalts to rhyolites. The source of partitioning data is summarised in Table 1.

The mineral/melt K_d s obtained from these papers were plotted against the SiO_2 contents in their matrix for each element. K_d s for most of the elements display a positive correlation with the acidity of their melt and can be as much as thousand times higher in acid than in basic melts (e.g. Ba). A best fit (linear regression) line indicating the general trend between the partition coefficients and the SiO_2 has been drawn through data points on each diagram. Then, mineral-melt partitioning values for basic, intermediate and acidic rocks have been determined on these lines for each element at 50, 60 and 70% SiO_2 respectively. The results are presented in Table 2 and Figure 2. They can be conveniently used by petrologists who deal with K-feldspars and need reliable K_d data. These recommended values were used in a FC modelling for collision-related volcanic rocks of the Erzurum-Kars Plateau (Fig. 3).

DEĞİNİLEN BELGELER

- Aitchison, S. J. ve Forrest, A. H. (1993), Quantification of crustal contamination in open magmatic systems, *Journal of Petrology*, V. 35, Part: 2, pp. 461-488
- Arth, J. G. (1976), Behaviour of trace elements during magmatic processes -a summary of theoretical models and their applications, *Journal of Research, U.S. Geological Survey*, V. 4, 41-47
- Cox, K. G., Bell, J. D. ve Pankhurst, R. J. (1989), *The Interpretation of Igneous Rocks*, sixth edition, Unwin Hyman, London

- Davidson, J.P., Ferguson, K.M., Colucci, M.T. ve Dungan, M.A. (1988), The origin and evolution of magmas from the San Pedro-Pellado volcanic complex, S. Chile: multicomponent sources and open system evolution, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 100, pp. 429-445
- Davidson, J.P., McMillan, N.J., Moor bath, S., Wörner, G., Harmon, R.S. ve Lopez-Escobar, L. (1990), The Navados de Payachata volcanic region (18°S/69°W, N. Chile) II. Evidence for widespread crustal involvement in Andean magmatism, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 105, pp. 412-432
- DePaolo D. J. (1981), Trace element and isotopic effects of combined wall-rock assimilation and fractional crystallisation, *Earth and Planetary Science Letters*, V. 53, pp. 189-202
- Guo, J. ve Green, T.H. (1989), Barium partitioning between alkali feldspar and silicate liquid at high temperature and pressure, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 102, pp. 328-335
- Güleç, N. (1991), Crust – Mantle interaction in Western Turkey: implications from Sr and Nd isotope geochemistry of Tertiary and Quaternary volcanics, *Geological Magazine*, V. 128, pp. 417-435
- Hildreth, E.W. (1977), The magma chamber of the Bishop Tuff: gradients in temperature, pressure and composition, *PhD thesis, University of California, Berkeley*, 328 p.
- Irving, A.J. (1978), A review of experimental studies of crystal/liquid trace element partitioning, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 42, pp. 743-770
- James, D.E. (1982), A combined O, Sr, and Pb isotopic and trace element study of crustal contamination in Central Andes lavas, I. Local geochemical variations, *Earth and Planetary Science Letters*, V. 57, pp. 47-62
- Keskin, M. (1994), Genesis of collision-related volcanism on the Erzurum-Kars Plateau, North Eastern Turkey Unpublished, *PhD thesis, University of Durham*, 358 p.
- Keskin, M. (1996-1997), Pasinler Platosu'ndaki Çarpışma-Kökenli Volkanik İstifin Volcano-Stratigrafisi, Jeokimyası ve Magma Odası İşlemlerinin Petrolojik Modellenmesi; Erzurum-Kars Platosu, KD Anadolu, *İ.Ü. Yerbilimleri Dergisi*, V. 10, s. 59-57.
- Keskin, M. (1998) Erzurum-Kars Platosu'nun Çarpışma Kökenli Volkanizm Volcano-Stratigrafisi ve yeni K/Ar Yaş Bulguları Işığında Evrimi, Kuzeydoğu Anadolu, *M.T.A. Dergisi* 'nde baskıda.
- Keskin, M. Pearce, J. A. ve Mitchell, J. G. (1998), Volcano-Stratigraphy and Geochemistry of Collision-Related Volcanism on the Erzurum-Kars Plateau, North Eastern Turkey, *Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volcanism in Anatolia*, V. 85, pp.355-404.
- Leeman, W.P. ve Phelps, D.W. (1981), Partitioning of rare elements and other trace elements between sanidine and coexisting volcanic glass, *Journal of Geophysical Research*, V. 86, no. B11, pp. 10193-10199
- Lemarchand, F., Villemant, B. ve Calas, G. (1987), Trace element distribution coefficients in alkaline series, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 51, pp. 1071-1081
- Mahood, G. ve Hildreth, W. (1983), Large partition coefficients for trace elements in high-silica rhyolites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. , pp. 11-30
- Mahood, G.A. ve Stimac, J. A. (1990), Trace-element partitioning in pantellerites and trachytes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 54, pp. 2257-2276
- Nagasawa H. (1971) Partitioning of Eu and Sr between coexisting plagioclase and K-feldspar, *Earth and Planetary Science Letters*, V. 13, pp. 139-144
- Nagasawa H. (1973), Rare-earth distribution in alkali rocks from Oki-Dogo Island, Japan, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 39, pp. 301-308
- Nash, W. P. ve Crecraft, H. R. (1985), Partition coefficients for trace elements in silicic magmas, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 49, pp. 2309-2322
- Pearce, J. A. ve Norry, M. J. (1979), Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 69, pp. 33-47
- Pearce, J.A., Bender, J.F., De Long, S.E., Kidd, W.S.F., Low, P.J., Güner, Y., Şaroğlu, F., Yılmaz, Y., Moor bath, S. ve Mitchell, J.G. (1990), Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, V. 44, pp. 189-229
- Philpotts, J.A. ve Schnetzler, C.C. (1970) Phenocryst-matrix partition coefficients for K, Rb, Sr and Ba, with applications to anorthosite and basalt genesis, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 34, pp. 307-322
- Powel, R. (1984), Inversion of the assimilation and fractional crystallisation (AFC) equations; characterisation of contaminants from isotope and trace element relationships in volcanic suites, *Journal of Geological Society of London*, V. 141, pp. 447-452
- Ryerson, F. J. ve Hess, P.C. (1978), Implications of liquid-liquid distribution coefficients to mineral-liquid partitioning, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 42, pp. 921-932
- Stix, J. ve Gorton, M.P. (1990), Variations in trace element partition coefficients in sanidine in the Cerro

- Toledo rhyolite, Jemez Mountains, New Mexico: effects of composition, temperature, and volatiles, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 54, pp. 2697-2708
- Sun, S. S. ve Hanson, G. N. (1976)**, Rare earth element evidence for differentiation of McMurdo Volcanics, Ross Island, Antarctica, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 54, pp. 139-155
- Taylor, H.P. (1980)**, The effects of assimilation of country rocks by magmas on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ systematics in igneous rocks, *Earth and Planetary Science Letters*, V. 47, pp. 243-254
- Villemant, B. Jaffreziec, H., Joron, J. L. ve Treuil, M. (1981)**, Distribution coefficients of major and trace elements; fractional crystallisation in the alkali basalt series of Chaîne des Puys (Massif Central, France), *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 45, 1997-2016
- Watson, E. B. (1976)**, Two-liquid partition coefficients: experimental data and geochemical implications, *Contribution to mineralogy and Petrology*, V. 56, pp. 119-134
- Wörner, G., Beusen, J.-M., Duchateau, N., Gijbels, R. ve Schmincke, H.-U. (1983)**, Trace element abundances and mineral-melt distribution coefficients in phonolites from the Laacher See Volcano (Germany), *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 84, pp. 152-173

Makalenin geliş tarihi: 12.01.1998

Makalenin yayına kabul tarihi: 04.05.1998

Received January 12, 1998

Accepted May 04, 1998