

Ada Yayı Dizgelerinin Petrolojik Evrimi^(*)

A. E. RINGWOOD

ÖZ

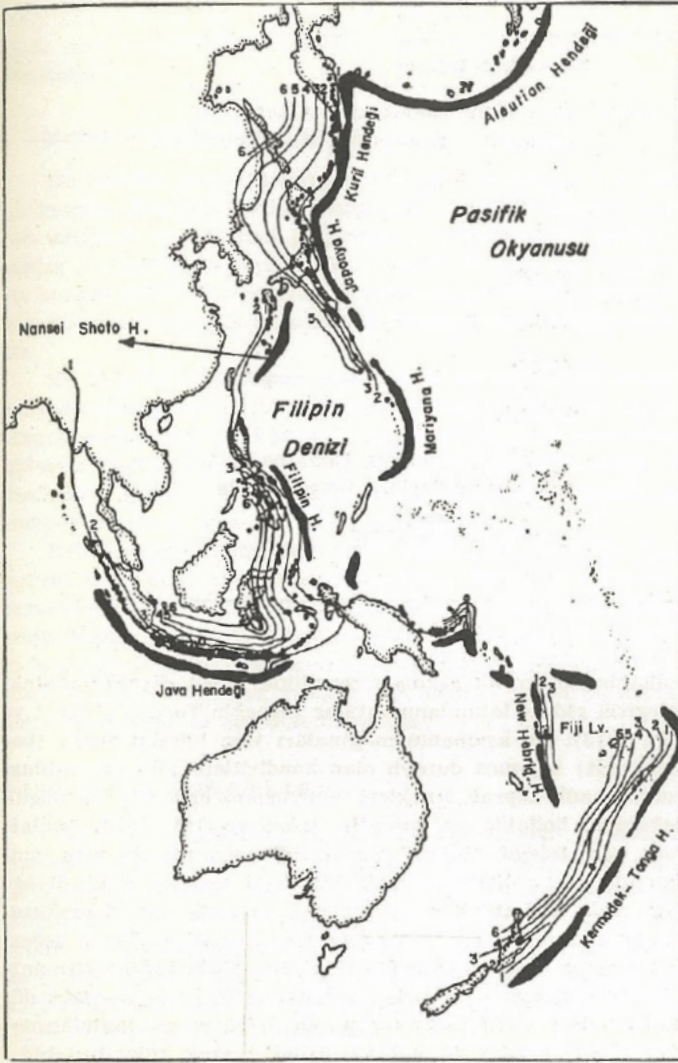
Ada yayı dizgelerinin gelişimi ile ilgili en önemli petroloji sorunu bazalt-andezit-dasit-riyolit volkanik takımının kökenidir. Bu takımın özgül nitelikleri yazıda yeniden gözden geçirilmektedir. Bu nitelikler etkin volkanların Benioff kuşaklarına göre dağılımlarını, magmaların kimyasal bileşim ve bölümlenme gidişlerini (fractionation trends), ada yaylarının çoğu kez daha sonraki kalkalkali bir dönemle izlenen toleyitik dönemini içeren zaman içerisindeki evrimsel gelişimini, Benioff kuşağı üzerindeki yüksekliğe bağlı olarak magmaların potasyum ve diğer uyumsuz elementlerce zenginleşme gidişini kapsamaktadır.

Deneyisel petrolojideki en son araştırmalar volkanik takımın çeşitli özgül niteliklerinin nedeni olabilecek üç bölümlenmeye bağlı denetlenmeyi (fractionation control) ortaya koymaktadır. Bu denetlemeler şunlardır; amfibolce denetlenen bölümlenme (amhibole-controlled fractionation), eklojitce denetlenen bölümlenme, yüksek su buharı basıncı altında pirolit mantonun doğrudan tikel ergimesi (partial melting). Bu süreçlerin uygulanışı yazıda gözden geçirilmektedir. Amfibolce denetlenen bölümlenme 100 km'den daha sığ derinliklerde oluşmaktadır. Bu bölümlenme K/Na ve nadir toprak elementi bolluklarındaki küçük bir değişiklik, kalıntı eriyikler arasında kalkalkali bir gidişe neden olmaktadır. Aynı biçimde, eklojitce denetlenen bölümlenme de kalkalkali gidişe neden ol-

maktadır. Ancak bu süreç K/Na oranları ve nadir toprak elementlerinin bölümlenmesindeki artışın eşliğinde, olasılıkla 100 — 150 km arasındaki derinliklerde oluşmaktadır. Yüksek P_{H_2O} altında mantonun kısmi ergimesi bazalt magmasının 70 — 100 km arasındaki derinliklerdeki oluşumunun nedeni olarak gösterilmektedir. Yükselme nedeniyle bu magmalar çoğunlukla olivinin kristallenmesiyle bazaltik andezit ve andezit bileşimlerine bölümlenir. Oluşan eriyikler toleyitik ayırmılaşma (differentiation) gidişi göstermektedir.

Ada yayı ortamındaki bu süreçlerin uygulanışı için bir model önerilmektedir. Yitik okyanus kabuğundaki amfibolit ergime noktası altındaki koşullarda (subsolidus conditions) 70 — 100 km'lik derinliklerde suyunu yitirmektedir. Su Benioff kuşağı üstündeki pirolit kaması içinde kısmi ergime oluşumu için gerekli koşulları sağlamaktadır. Bu nedenle magmalar, ada yayı gelişiminin ilk toleyitik aşamasını oluşturmak için yüksek P_{H_2O} altında ayırmılaşmaya uğramaktadır. Okyanus kabuğu 100 — 150 km'lik derinliklere yiterken, yüksek P_{H_2O} yapısına su almış magnezyum silikatın yüksek basınç türevinin ve serpentinitin sularını yitirmeleriyle korunmaktadır. Kuvars eklojitli okyanus kabuğunun tikel ergimesi riyodasit magmasını oluşturur. Bu magmalar piroksenit oluşturmak için üstteki pirolit mantosu ile etkileşmektedir. Piroksenit diyapirleri Benioff kuşağından yukarıya doğru yükse-

(*) A. E. RINGWOOD'un Journal of the Geological Society, 1974, 130/3, 183-204'deki "The petrological evolution of island arc systems" adlı yazısından M. Yılmaz KATI (M.T.A., Temel Araştırmalar Dairesi) tarafından türkçeleştirilmiştir.



Sekil 1: Batı Pasifik'teki hendekler, Benioff kuşakları ve etkin volkanlar. Benioff kuşaklarındaki derinlikler 100 km'lik yükselti eğrileriyle, volkanlar siyah noktalara gösterilmiştir. (GSA'nın izniyle Oxburgh ve Turcotte, 1970'den).

ilir. Bu diyapirler tikel olarak ergiyerek eklojit kristallenmesi (80 — 150 km) ve amfibol kristallenmesi (30 — 100 km) ile bölünme yoluyla magmaları oluşturmakta, bunun sonucu olarak ada yayı gelişiminin kalkalkali aşaması gerçekleşmektedir.

Yaklaşık 150 km aşağıya batan taşıyıcı levhalarındaki kalıntı, ergimez eklojit ve peridotit dönüşümsüz bir biçimde ayrımlaşmakta ve okyanus ortası sırtlarındaki bazalt magmalarının oluşumuna hiç bir zaman katılamamaktadır. Son olarak, bütünleyici ayrımlaşma ada yaylarının gelişerek birleşmesiyle ve andezitik volkanik takımın eklenmesiyle zaman içerisinde gelişen kıta kabuğunun yukarıda tartışıldığı gibi oluşmasıdır. Mantonun hacminin yaklaşık % 30 — 60'ının bu tek yönlü (irreversible) ayrımlaşma sürecinden geçtiği düşünülmektedir.

Ada yaylarının evrimi ile ilgili olasılıkla en önemli petroloji sorunu bu bölgelerin tanıtmaları olan volkanik kayaların

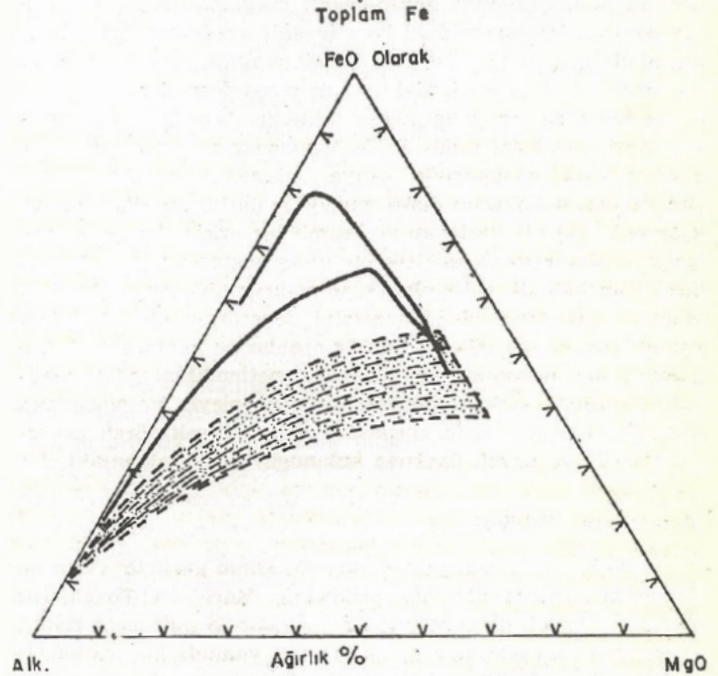
kökünü ile ilişkilidir. Bu kayalar "dağ oluşum volkanik dizileri" diye ortak bir adla anılan bazalt-andezit-dasit-riyolit takımını kapsamaktadır. Ada yayları ana olarak böylesi kayalardan, bunların plütonik karşılıklarından ve birden çok kez devreye girme sonucu gelişmiş türevlerinden oluşmaktadır. Mantodan türemiş dağ oluşum magma dizisinin üyelerinden oluşan ada yaylarının kenar eklenmesi yoluyla jeolojik zaman içerisinde kıtaların oluştukları ussal bir düşünüş olarak ileri sürülmektedir. Eğer bu sav doğrudursa, dağ oluşum volkanik dizilerinin taşoluşumlarının yer bilimlerinde çok önemli bir sorun olduğu açıktır. Bu dizilerin pek çok özgül niteliği vardır. Bu niteliklerin herhangi bir taşoluşum (petrogenesis) kuramıyla açıklanması gerekir. Aşağıda bu nitelikler tartışılmaktadır.

ÖZGÜL NİTELİKLER

Alansal Dağılım

Dağ oluşum türü etkin volkanizma tanıtmaları bir biçimde okyanus hendekleri ve taşıyıcı yitme kuşakları ile ilişkilidir (Şekil 1).

Olağan olarak Benioff kuşakları üstünde yer alan volkanlar 80 — 150 km'lik yüksekliklerde dir. Bu ilişkiler dağ oluşumu volkanik dizilerinin kökeninin, Benioff kuşakları yakınında oluşan süreçlere bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.



Sekil 2: Tanıtıcı toleyitik ve kalkalkali gidişleri gösteren (toplam demir, FeO olarak; MgO; Na₂O + K₂O) FMA diyagramı. Toleyitik bölge Skaergaard Girmesi (Wager ve Deer, 1939) ve Thingmuli volkanında (Carmichael, 1964) gözlenen ayrımlaşma gidişleriyle belirlenmektedir. Kalkalkali bant Cascade, Aleutian ve Yeni Zelanda kalkalkali bölgelerindeki magmaların gösterdiği ayrımlaşma gidişlerini kapsar.

Çizelge 1: Ada yayı toleyit ve kalkalkali takımlarının özgül nitelikleri

	Ada yayı toleyitleri	Kalkalkali takımı
Örnekler	Mariyana, Tonga, İzu, Güney Sandviç yayınları	Batı Hint, Endonezya, Aluetianlar, Japonya, Kamçatka, Yeni Zelanda
Aşama	erken	geç
Başat magma	bazalt, bazaltik andezit	andezit
SiO ₂ değeri	% 55	% 60
Bölümlenme	Toleyitik	kalkalkali
Cr, Ni, Mg, Ti	düşük	düşük
K/Na	düşük	yüksek
Nadir topraklar	bölümlenmemiş, kondiritik	güçlü bölümlenmiş hafif nadir toprak elementlerince zenginleşmiş
Uyuşmaz elementler (örneğin Ba, La, U, Th, Zr, Ta)	10-30 x kondiritik	30-100 x kondiritik

Kimyasal Bileşimler ve Bölümlenme Gidişleri

Porfiritik üyelerin hamurlarının ve afanitik üyelerin incelenmesi bazalt-andezit-dasit-riyolit takımının alçalan bir eriyik çizgisi oluşturduğunu ve eriyik bileşimlerinin uzantısının ana üyeler arasında bulunduğunu göstermektedir (Kuno, 1950).

FMA diyağramı dağılım volkanik dizilerinin ve kabuk ortamında kristallenen gabro-bazalt magmalarının bölümlenme davranışları arasındaki bazı önemli ayrılıkları ortaya çıkarmaktadır (Şekil 2). Gabro-bazalt magması (örneğin Skargaard) erken aşamalarda demir zenginleşmeleriyle tanımlanan toleyitik bir gidiş göstermektedir. Bu olgu denge eriyiklerinden çok daha düşük Fe/Mg oranları olan olivinler ve piroksenlerin ayrılmasıyla ortaya çıkmaktadır (Çizelge 3). Öte yandan dağılım dizisi genellikle mafikten alkali ucuna uzanan bir seridi kaplayan ve önemli bir erken demir zenginleşmesi göstermeyen değişik bir gidiş gösterir (Şekil 2). Bu durum kalkalkali gidiş olarak adlandırılmaktadır. Bölümlenmenin, toleyitlerin bölümlenmesini denetleyen olivinlerle piroksenlerden daha yüksek Fe/Mg oranlarına sahip olan ferromagnezyum evresinin ayrılmasıyla denetlendiğini göstermektedir. Bundan başka dağılımı dizisi toleyit magmalarının kristallenmesi sırasında oluşandan daha yüksek göreli değerlerde geçiş ve asidik üyelerin bulunuşuyla tanımlanmaktadır.

Yer-Zaman İlişkileri

Baker (1968) ada yayı volkanizmasının görünür evrimsel dizilimini göstermiştir. Güney Sandviç, Mariyana, Tonga, İzu adaları gibi görece genç yaylar bazalt-andezit-dasit-riyolit arasındaki tüm bileşimleri göstermeleri yanında başlıca bazalt ve bazaltik andezitten oluşmuşlardır. Öte yandan daha gelişmiş yaylar (örneğin Japonya, Endonezya, Kamçatka, Küçük Anteller, Aleutianlar) tüm bileşimleri de gösterirlerse de başlıca andezitten oluşmuşlardır.

Jakes ve White (1969), Jakes ve Gill (1970), Gill (1970)'in yaptıkları daha sonraki araştırmalar ek olarak önemli yerkimyasal gidişleri ortaya çıkarmıştır (Çizelge 1). Ada yayı

volkanizmasının ilk aşaması genellikle FMA diyağramındaki toleyitik gidişle tanımlanmaktadır (örneğin Tonga) (Ewart ve diğ., 1973). Bu aşamanın magmaları tüm bileşim sırası (bazalt-dasit) boyunca duraylı olan kondiritlere göre ayrımlaşmamış nadir toprak örnekleri ve uyuşmaz elementlerin düşük değerdeki bolluklarına sahiptir. Jakes ve Gill (1970) bunları "ada yayı toleyit dizileri" olarak adlandırmışlardır. Öte yandan ada yayı volkanizmasının daha ileri aşaması FMA diyağramındaki kalkalkali gidiş gösteren lavlarla tanımlanmaktadır. Bu magmalar belirli bir SiO₂ içeriğine göre yüksek değerde uyuşmaz element (örneğin K, U, Ba, Nadir toprak elementleri) bolluklarına sahiptirler ve bölümlenmiş nadir toprak düzenlenmeleri (hafif nadir toprak elementlerince zenginleşmiş) gösterirler. Bunlar 'kalkalkali diziler' olarak adlandırılabilirler.

Bu evrimsel gelişme tüm ada yaylarında açık olarak görülemezle birlikte, yazar bu gelişimin, taşoluşum kuramı için önemli bir sınır koşulu ortaya koymakta yeterli genellik ve gerçekliğe sahip olduğuna inanmaktadır.

Bileşim-Derinlik İlişkileri

Dağılım türü magmaların Benioff kuşağı üstündeki uzaklığa da uygun olarak, hendekten uzaklaştıkça daha çok alkali olmaya eğilim gösterdikleri uzun süredir bilinmektedir. Dickinson ve Hatherton (1967) ve Dickinson (1968) bu ilişkinin özellikle potasyumla ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Magmaların (belirli bir SiO₂ içeriğine göre) özgül potasyum içerikleri diyağramda Benioff kuşağına göre volkanların derinliklerine göre gösterildiğinde, derinliğe bağlı olarak potasyumun artması biçiminde belirgin bir ilişki (noktalar biraz saçılmış durumdaysa da) gözler önüne serilmektedir (Şekil 3). Yazarlar bu ilişkiyi Benioff kuşağı yakınındaki taşoluşum ve fiziko-kimyasal süreçler arasındaki bağlantıyı (örneğin ergime dengesi üstündeki basınç denetimi) açıklamada kullanılmaktadır.

Diğer bir çok uyuşmaz iz elementin potasyumla büyük ölçüde denestirilebildiği bilinmektedir. Aynı biçimde, nadir toprak bölümlenmesinin derecesi potasyum içeriği ile artma

eğilimindedir (Taylor, 1969; Gill, 1970). Bu nedenle bileşim-derinlik ilişkisi yukarıda tartışılan K'ca zengin kalkalkali dizilerin K'ca yoksul ada yayı toleyit dizilerine göre daha derinlerde oluşabildiği biçimindeki evrimsel ilişki ile bağlantılı görünmektedir.

1 Atmosfer'deki Ergime İlişkileri

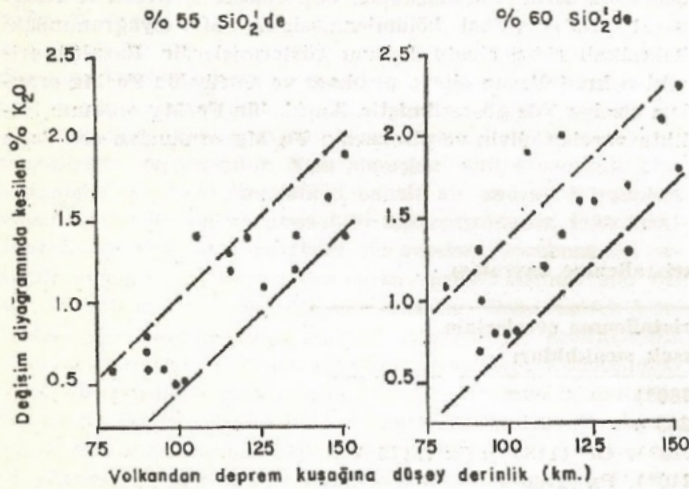
Bu ilişkiler kalkalkali kayalar dizisi için Çizelge 2'de gösterilmiştir. Belirgin özellik plajyoklas kristallenmesinin yüksek sıcaklığı ve yalnızca plajyoklasın kristallendiği geniş sıcaklık aralığıdır. Bu olgu özellikle dasitte belirgindir. Plajyoklas burada 1275°C'da ortaya çıkmakta ve piroksenle birleşmeden önce 100°C'ı aşan bir sıcaklık aralığında kristallenmektedir.

Bu ilişkiler dağılım volkanik dizilerinin, kristallenme ayrımlaşması yoluyla bir atmosfer basıncı altında ana bazalt magmasından (parental basaltic magmas) gelişmiş olma olasılıklarını büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Andezit ve dasit gibi yüksek normatif plajyoklaslı kayalar bazaltla ri-yodasit arasında ısıl bir engel oluştururlar.

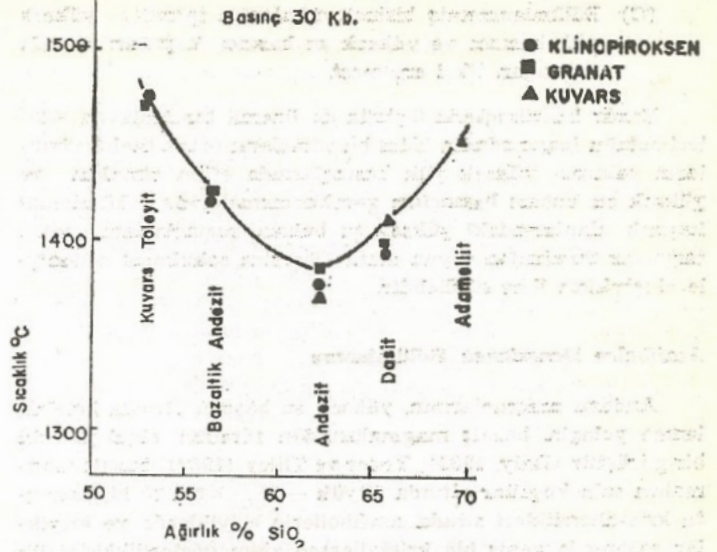
Kristal-eriyik bölünmesiyle dağılım volkanik dizilerinin taşoluşumunu açıklama amacını güden herhangi bir varsayımın, ferromagnezyum minerallerine göre plajyoklasın kristallenme alanını daraltmak için bir mekanizma gerektirdiği kesindir. Göreceğimiz üzere bu mekanizma yüksek su basıncı, yüksek su basıncı, yüksek yük basıncı ya da bu etkenlerin bileşimiyle oluşturulabilmektedir.

TAŞOLUŞUM KURAMLARI

Dağılım volkanik dizilerine ait daha önceki yayınlarda öne sürülmüş bir çok taşoluşumu kuramı vardır. Bu kuramlar içerisinde önceden varolan sialik kayaların ergimesi, kristalin sialle ya da tortullarla bulaşmış (contamine) bazalt magmalarının ayrımlaşması, melezleşme (hybridism), manyetitnin büyük ölçüde çökmesi ile sonuçlanan yüksek oksijen basınçları altında bazalt magmalarının yüksek değerlerde ayrımlaşma kristallenmesi sayılabilir.



Şekil 3: Yayların altındaki Benioff kuşaklarına karşılık gelen volkanların derinliklerine karşı seçilmiş ada yayı lavlarındaki potasyum düzeyleri alanı. (AGU'nun izniyle Dickinson, 1968 den).



Şekil 4: Bir kalkalkali magma dizisinin 30 kbar'daki kristallenmesinin değerlendirilen eriyik sıcaklıkları ve dizilimi. (Contr. Miner. Petr.'nin izniyle T. Green ve Ringwood, 1968'den).

Bu süreçler yayınlarda ayrıntılı bir biçimde tartışılmıştır (örneğin T. Green ve Ringwood, 1968). Genellikle bu süreçlerin her biri olasılıkla özel durumlarda etkin olmakla birlikte, bunların ada yayı ortamındaki tüm dağılım magma dizilerinin son taşoluşumlarının nedeni olmadığı gittikçe açıklık kazanmaktadır. Genel olarak uygulandığında her bir mekanizma bir dizi engelleyici güçle karşılaşır. Bu güçlüklerin bir bölümü bir çok ada yayının kıtalardan uzak okyanus alanları içerisinde (önceden varolan yağlı kıta kayaları olmaksızın) gelişmeleridir (Gorshkov, 1962). Taşyuvur yitim kuşakları ile kökensele ilişkisinin kanıtı ve Sr izotop çalışmaları ile birleştirilen bu gözlem, bu magmaların en son kaynağının mantoda aranması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Yazarın gabro-diyorit-granodiyorit-granit plütonik dizilerini değil de, yalnızca dağılım magmatik topluluğunun volkanik üyelerini tartıştığı okuyucuların gözünden kaçmayacaktır. Gabro-diyorit-granodiyorit-granit plütonik dizisi genellikle, derinlerde kristallenmiş dağılım türü birincil magmaları tanımlar ve bu nedenle dağılım volkanik dizisinin plütonik karşılığıdır. Tüm bunlara karşın diğer bir çok plütonik kayanın kabuk ortamındaki aşırı başkalaşım ve tikel ergimeyle (genellikle, büyük bölümü dağılım volkanik kayalarından en son olarak türemiş olan tortullardan) oluştuklarını gösteren bir çok kanıt vardır (Dickinson, 1962) Bu nedenle dağılım magmatik topluluğunun plütonik üyeleri olasılıkla, volkanik üyelerden daha ileri derecede çok kökenlidir (polygenetic). Volkanik üyeler için yukarıda benimsenmeyen mekanizmalardan bazıları bu durumda önemli olabilir.

Petrolojide son zamanlarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar dağılım volkanik dizilerinin kökeninde etkin olabilecek üç mekanizma daha ortaya çıkarmıştır. Bunlar şunlardır :

- Amfibolün kristallenmesi ya da amfibolit tikel ergimesiyle denetlenen, bazalt magmasının bölünmesi.
- Eklojitin kristallenmesi ya da kuvars eklojitin tikel ergimesiyle denetlenen, bazalt magmasının bölünmesi.

(C) Bölünmemiş birincil mantonun (pirolit) yüksek yük basıncı ve yüksek su basıncı koşulları altında doğrudan tikel ergimesi.

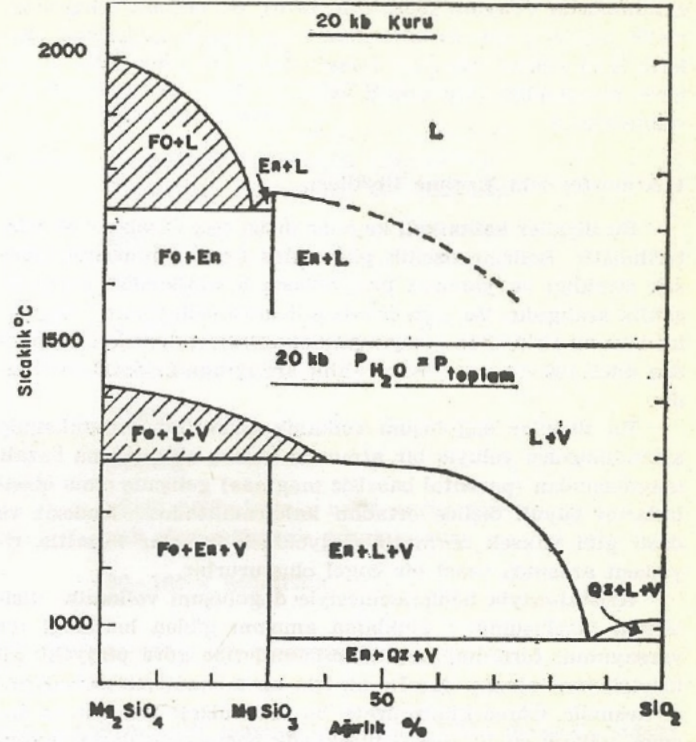
Yazar bu süreçlerin üçünün de önemli tamamlayıcı etkileri olduğu inancındadır. Tüm bu süreçlerin ortak özelliği bunların yalnızca yüksek yük basınçlarında etkin olmaları ve **yüksek su buharı basınçları** gerektirmemeleridir. Mantonun kaynak alanlarındaki yüksek su buharı basınçlarının yitik taşıyıcı tarafından suyun manto içersine sokulması nedeniyle oluştukları ileri sürülebilir.

Amfibolce Denetlenen Bölünme

Andezit magmalarının, yüksek su basıncı altında kristalleme yoluyla bazalt magmalarından türediği oldukça eski bir görüştür (Daly, 1933). Yoder ve Tilley (1962), bazalt magmaları sulu koşullar altında ($P_{\text{yük}} = P_{\text{H}_2\text{O}}$) 5 - 10 kb basınçta kristallendikleri sırada amfibollerin eriyiklerde ve eriyikler yakınında geniş bir kristalleme alanı gösterdiklerini ilk kez ortaya atmışlardır. Ancak bu araştırmacılar bu sonuçlarını dağılım volkanik dizilerinin taşoluşumlarına uygulamamışlardır.

1968'de T. Green ve Ringwood amfibolce denetlenen kristallenmenin dağılım volkanik dizilerini oluşturabilme olanaklarını araştırmak istemişlerdir. Deneysel çalışmalarla 3-5 kb'lık su buharı basıncı ve 10-20 kb'lık yük basınçları altında bazalt-bazaltik andezit, dasit ve diyodasiti kristallendirmişlerdir. Eriyik ve eriyiğe yakın evrelerin bileşimleri ölçülmüştür. Bu işlem kalıntı eriyik bileşimlerini hesaplanmış olarak alıp, niceliksel bölünme gidişleri elde edilerek gerçekleştirilmiştir. Böylece amfibolün alanı bazalt-andezit bileşimleri arasındaki eriyikler üstünde ve yakınında bulunmuştur. Amfibol %40 SiO_2 içeriğiyle silisce yoksul olarak bulunmaktadır. Bazaltın 10-20 kb arasındaki bilinen koşullarda amfibol + piroksen ayrılmasıyla andezit ve dasit bileşimlerine bölümlendiği açıklığa kavuşmuştur. Diğer bir seçenek, amfibolitin tikel ergimesinin bu koşullar altında andezit ya da dasit magmasını oluşturabilmesidir.

Düzenli bir biçimde denetlenmemiş $P_{\text{H}_2\text{O}}$ altında yapılan bu deneyler daha ileri deneylerle sürdürülmüş ve yukarıdaki sonuçlar büyük ölçüde doğrulanmıştır (T. Green, 1972; T. Green ve Ringwood, 1972; Holloway ve Burnham, 1972). Holloway ve Burnham (1972) da 5-10 kb basınçlarda amfibolitin tikel ergimesinin küçük bir bölümünün dasit magmasını oluşturduğunu ortaya koymuşlardır.



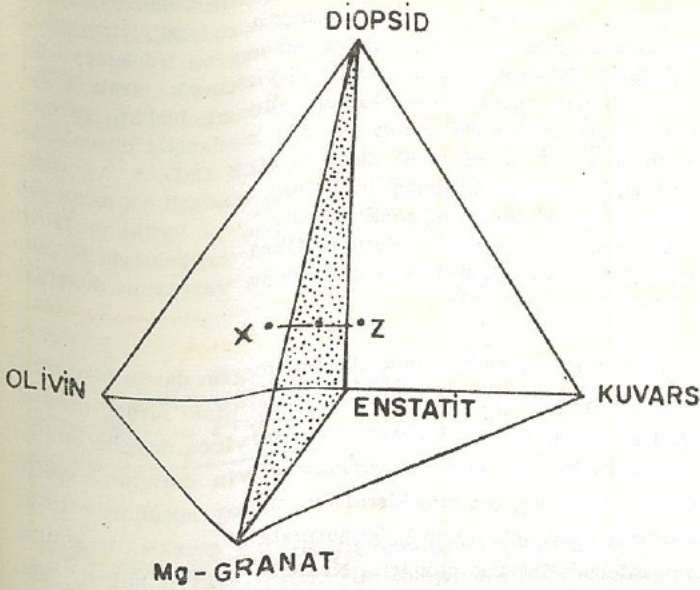
Şekil 5: 20 kbar (susuz) ve 20 kbar ($P_{\text{yük}} = P_{\text{H}_2\text{O}}$)'daki $\text{MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ dizgesi. Kushiro ve Yoder, 1969'a göre.

Amfibolce denetlenen böylesi bir bölünme bazı özel özgül niteliklere sahiptir. Amfibolün K/Na oranı kristallendiği eriyiğin K/Na oranı ile bağdaşır olduğundan, bu nitelikteki bölünme kalıntı eriyiği ya da tikel eriyiğin K/Na oranını büyük ölçüde değiştirmeyecektir. Benzer nedenlerle, amfibolce denetlenen bölünme nadir toprak elementlerini bölümlendiremez. Bundan başka, amfibolün yüksek basınçlardaki duraysızlığı ve granat + piroksen + H_2O 'ya dönüşümü nedeniyle (D. Green ve Ringwood, 1967; Lambert ve Wyllie, 1968; şekil 8), amfibolce denetlenen böylesi bir bölünme 90-100 km'den daha derinlerde oluşamaz. Son olarak T. Green ve Ringwood (1968) amfibol bölünmesinin FMA diyagramındaki kalkalkali gidışı oluşturduğunu göstermişlerdir. Bazaltik eriyikten kristallenen olivin, piroksen ve amfibolün Fe/Mg oranları çizelge 3'de gösterilmiştir. Amfibolün Fe/Mg oranının birlikte varolan olivin ve piroksenin Fe/Mg oranından çok daha

Çizelge 2: Batı Hint kalkalkali kayalar dizisinin kristallenme davranışı

No	Kaya	% SiO_2	Ana kristallenme evrelerinin en yüksek sıcaklıkları
16 K	Olivin bazalt	47.9	PI (1280°)
20 L	Olivin bazalt	50.5	PI (1245°)
27 V	Olivin bazalt	50.5	PI (1215°), Ol (1185°), Px (1175°)
19 K	Hipersten andezit	59.7	PI (1240°), Px (1180°)
21 L	Hipersten andezit	60.7	PI (1255°), Px (1180°)
23 L	Biyotit dasit	69.9	PI (1275°), Px (1180°)

Brown ve Schairer (1968)'den, PI : plajyoklas, Ol : olivin, Px : piroksen



Şekil 6: 25 kbar'dan daha yüksek basınçlarda mantodaki ergime tarzını gösteren diyagram. Belirtilen diopsid-enstatit, Mg granatın düzlemi, kuru koşullar altında bir ısısal bölüm oluşturan ancak, yüksek su basınçlarında birincil olivin alanına geçen eklojit düzlemidir.

yüksek olduğu ve eriyiğin Fe/Mg oranına benzediği görülmektedir. Bu nedenle amfibolün ayrılması olivin ve piroksen kristallenmesi ile gelişebilecek toleyitik erken demir zenginleşmesi gidişini oluşturmamaktadır.

Eklojitce Denetlenen Bölümleme

Dağoluşum türü bir çok volkan Benioff kuşağı üzerinde 100 km'den daha büyük bir yükseltide yerleşmiştir. Bu magmalar Benioff kuşağı yöresinden türemişlerse, bu derinliklerdeki basınçlar (30 - 50 kb) amfibollerin duraylılığının geçerli olması için çok yüksektir ve bölümleme süreçleri etkin olması gereken amfibollerden daha başka evrelerle düzenlenmektedir. T. Green ve Ringwood (1968) başlangıç olarak susuz koşullarda 20 - 40 kb arasında dağoluşum volkanik kayaları dizisinin kristallenmesini araştırmışlardır. Eriyiğe yakın evrelerin bileşimleri, kalıntı eriyiklerin ayrımlaşma gidişlerinin önceliksel olarak saptanmasını benimseyerek, elektroprob mikroanalizlerle ölçülmüştür. Bazı sonuçlar şekil 4 üzerinde gösterilmiştir. 20 kb'ın üzerindeki bazalt ve andezit bileşimleri arasındaki bölümleme granat ve klinopiroksenin (eklojitin) kristallenmesiyle denetlenmiştir. Bu evrelerin ayrılmasının bazaltik andezitten, andezit bileşimine ayrımlaşmak için bir ana bazalt gerektirdiği ortaya çıkmıştır. Daha asidik bileşimlere ayrımlaşma çok geniş birincil kuvars kristallenme alanıyla engellenmiştir (Şekil 4). Andezit bileşimi dizilimdeki ısısal bir koyakta yer almaktadır. Sonuçlar kuvars eklojitin (bazaltik bileşim) 20 - 40 kb'deki tikel ergimesinin ilk olarak bir andezit oluşturacağını göstermektedir. Tikel ergimenin daha yüksek bir derecesinde bazaltik andezit oluşabilmektedir.

Dasit ve riyodosit eriyiklerini oluşturmada bu mekanizmanın yetersizliği bazı ek etkenler gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle yukarıda adı geçen araştırmacılar önemli bir tikel su buharı basıncındaki $P_{H_2O} = 3 - 5$ kb) ergime dav-

ranışını incelemişlerdir. Şekil 4'ün daha asidik bileşimlerinde kuvars alanının aşırı düşüşü ortaya çıkarılmıştır. Demirce zengin granat, kuvars yerine andezit, dasit ve riyodasit bileşimli eriyik üzerinde görece düşük sıcaklıklarda (900 - 1100°C) kristallenmeye başlamıştır. Kristallenme dengesinin denetlenmesinde granatın piroksene göre önemi eriyikler daha çok asidikleştikçe artmıştır. Riyodasite dek uzanan sürekli bir eriyik bileşimi dizisinin bu sulu yüksek basınç koşulları altında granat ve klinopiroksenin bölünmesiyle oluşabildiği açıklık kazanmıştır. Sonuçlar da sulu yüksek basınç koşulları altında kuvars eklojitin küçük değerdeki tikel ergimesinin riyodasit ve hatta riyolit magması oluşturacağını doğrulamaktadır. Bunun yanı sıra daha büyük tikel ergime dasit ya da andezit oluşturmaktadır.

Bu sonuçlar ilk araştırmalardakilerden daha etkili bir biçimde denetlenmiş olan su içeriğine sahip kapalı kapsüllerdeki daha sonraki deneylerle de yinelenmiştir (T. Green, 1972; T. Green ve Ringwood, 1972). İlk çalışmada elde edilen en önemli sonuç doğrulanmış ve sunulmuştur.

Eklojitte denetlenen bölümleme eriyik ayrımlaşma kimyasında yansıyan bazı özgül niteliklere sahiptir. Kristal evresindeki düşük silis içeriği nedeniyle demirce zengin granatın başat olduğu yerde, özellikle daha asidik bileşimlerde, bu süreç silisdeki kalıntı eriyik zenginleşmesi için elverişli bir mekanizma sağlar. Bundan başka granatın (piroksenler ve olivinlere göre) yüksek Fe/Mg oranları nedeniyle kalıntı eriyikler toleyitik bir gidişten çok kalkalkali bir gidiş göstermektedir. (T. Green ve Ringwood, 1968). Eklojitik eriyiğe yakın piroksenler potasyum değil de, büyük değerinde sodyum içerikli olarak bulunmaktadırlar. Bu nedenle eklojit bölümlemesi kalıntı eriyiklerin Na/K oranlarında azalmaya neden olur. Aynı biçimde, granat bileşeni hafif nadir toprakları soğurmaksızın ağır nadir toprakları magmadan geriye çekerek nadir toprakların güçlü bölümlemesine neden olur. Bu etkiler kuvars eklojitin sulu koşullar altında düşük değerdeki tikel ergimesinin olduğu yerde daha çok güçlü olarak ortaya çıkmaktadır. İlk silisli eriyiğin oluşumu hafif nadir topraklar, yüksek K/Na oranı, ağır nadir toprakların düşük derecedeki bolluğu, güçlü bölümleme gösteren nadir toprak düzenleri içeren K ve diğer uyumsuz elementlerin kaynağa göre zengin oluşuyla tanımlanmaktadır.

Pirolitin Yüksek P_{H_2O} 'da Tikel Ergimesi

$P_{H_2O} = P_{yük} = 20$ kb'daki MgO-SiO₂-H₂O dizgesi Kushiro ve Yoder (1969) tarafından incelenmiştir. Bu araştırma-

Çizelge 3: $P = 8$ kb, $PH_2O = 5$ kb ve $T = 1000^\circ C$ (QFM buffer)'da toleyitten kristallenmiş evrelerin Fe (toplam)/Mg oranları

Evre	Fe/Mg (atomik oran)
Ana bazalt	0.64
Olivin	0.21
Klinopiroksen	0.23
Amfibol	0.69

Holloway ve Burnham (1972)'dan.

çılar $MgSiO_3$ 'ün sulu koşullarda forsterit + silisçe aşırı doygun bir eriyik olarak ergidiğini, oysa aynı (20 kb'lık) basınçta kuru koşullarda $MgSiO_3$ 'ün uyusan (congruent) bir biçimde eridiğini görmüşlerdir (Şekil 5). Yüksek su buharı basıncının forsteritin birincil alanının $MgSiO_3$ bileşimi boyunca genişlemesine neden olduğu görülmektedir. Mg_2SiO_4 ile $MgSiO_3$ arasındaki bir bileşimin bölünme kristallenmesi, bu nedenle (forsteritin etkiye noktasında, ya da daha önce ayrılması durumunda) silisçe aşırı doygun bir eriyiğin oluşumuna neden olur. Benzer biçimde, kristallerden eriyiğin ayrılması ile bir arada oluşan tikel ergime aşırı doygun bir eriyik oluşturur. Kushiro (1972) yüksek P_{H_2O} altındaki diğer yalnız dizgelerde benzer sonuçları gözlemiştir. Bu sonuçlar, varsayımlarını sunmalarında Kushiro ve Yoder (1969)'e yardımcı olmuştur. Bu varsayımına göre andezit ve dasit magmaları 70-100 km'lik derinliklerdeki yüksek su basınçları (20-30 kb) altında pirolitin tikel ergimesiyle doğrudan oluşmuşlardır.

Bu varsayım ilgili 'doğal' mineral dizgesindeki evrelerin ilişkileri gereğince düşünülebilmektedir (Şekil 6). Bu dörtlü dizgenin kapsamını (olivin-ortopiroksen-klinopiroksen-granat) mantonun kaynak bölgesini betimlemektedir. O'Hara (1963) susuz koşullar altında bu dizgenin eklojit düzleminin (klinopiroksen-granat-ortopiroksen) 25 kb üstündeki basınçlardaki ısısal bir bölünmeyi betimlediğini göstermiştir. Tikel ergimeyle oluşmuş tüm eriyikler bu engel olivin tarafında bulunmaktadır. Ergime eklojit düzlemindeki daha düşük sıcaklıklarda oluşur. 25-40 kb arasında oluşan düşük ergime eriyiklerinin bileşimleri normatif olivin yaklaşık % 30'unu içeren pikrittir. Kushiro ve Yoder'in varsayımı, yüksek P_{H_2O} 'da olivin birincil kristallenme alanının büyük ölçüde genişlediğini ve eklojit düzlemi boyunca (artık bir ısısal bölünme değildir) andezit (% 60 SiO_2) ve dasit (% 65 SiO_2) bileşimlerine uygun olarak kuvars doruğuna doğru uzanarak klinopiroksen-granat-ortopiroksen-kuvars değerine ayrıldığını ileri sürmektedir. Bu yolla, olivin birincil alanındaki çok belirgin uzantı açıklanmaktadır.

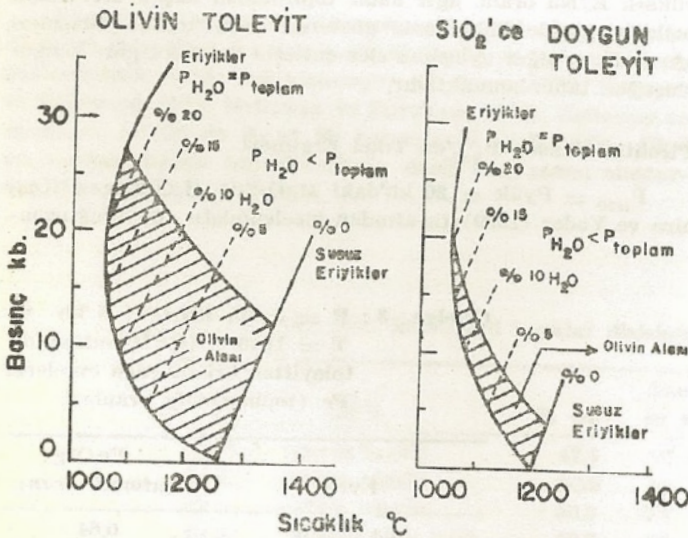
Kushiro ve diğ. (1972) bir lerzolit yumrusunu tikel ergiterek ($P_{H_2O} = P_{yük} = 26$ kb) ve oluşan eriyiği elektronprob mikroanaliz yöntemiyle ölçerek bu varsayımı irdelemeye çalışmışlardır. 26 kb ve $1190^\circ C$ 'da bütünü yaklaşık olarak % 20'si kahntı olivin, ortopiroksen, klinopiroksenle birlikte varolan bir cama ergimıştır. Su içeriği (% 13) nedeniyle düzenlemeden sonra susuz camın % 68 SiO_2 , % 10.2 CaO, % 0.6 MgO, % 1.1 FeO içerdiği görülmüştür. Sonuç, andezit ve dasit eriyiklerinin 20-30 kb'lık basınçlarda ($P_{H_2O} = P_{yük}$) periyotit ya da pirolit mantosunun doğrudan tikel ergimesiyle birincil magmalar olarak oluştuğunu ileri süren varsayımı doğrular niteliktedir.

Silis içeriği dışında eriyik bileşimi özgün dasite benzemektedir. Eriyik, olivin etkime noktasındaki pirolit mantosunun tikel eriyiğini betimlemekteyse, olivince doygun olması gerekmektedir. Bu koşulun yansısı olivin doruğuna doğru görülen bileşimlerdeki eriyiklerin bu deney koşulları altında sıvı evreler üzerinde olivin bulundurmaları gerekir. Bu sonuçların irdelemesini yapmak için, Nicholls (1973), bilinen bileşimli (Kushiro ve diğ., 1972) ancak % 5'lik olivin eklenmesiyle değişmiş bir dasit camını oluşturmuş ve $P_{H_2O} = P_{yük} = 26$ kb'daki kristallenme davranışını incelemiştir. Eriyik evresi olivin değil de, klinopiroksen olarak ortaya çıkmıştır. Eriyik sıcaklığı $940^\circ C$ 'dır. Böylesi bir eriyik kesinlikle olivinle dengede olamaz. Ayrıca, $1190^\circ C$ 'daki denge koşulları altında lerzolit tikel ergimesiyle oluşamaz.

Ayrılığın nedenleri pirolit ve ilgili bileşimler üstündeki yüksek basınçlar ve yüksek su basınçlarındaki tikel ergime deneyleriyle D.H. Green (1973) ve Nicholls (1973) tarafından araştırılmıştır. Benzer sonuçlar Kushiro ve diğ. (1972)'nce elde edilmiştir. Silisçe zengin eriyiklerin sönme sırasında denge eriyiğinden olivin + amfibolün hızlı, yarı duraylı kristallenmesiyle oluştuğu ortaya çıkarılmıştır. Bu olay 10 kb üzerinde yaygın olarak görülür ve ultramafik bileşimler üstünde yapılan doğrudan tikel ergime deneyleriyle denge eriyiği bileşimleri elde edilmesinde büyük güçlükler doğar.

Bu güçlükleri ortadan kaldırmak için Nicholls ve Ringwood (1972, 1973) değişik, ancak sabır isteyen bir yöntem izlemişler, değişik bileşimlerdeki birincil olivin kristallenme alanındaki P_{H_2O} etkilerini ortaya çıkarma amacıyla SiO_2 dizisini kapsayan eriyikler dizisinin eriyiğe yakın kristallenme davranışını araştırmışlardır (Çizelge 4).

Seçilen olivin toleyit bileşimi (Çizelge 4) şekil 6'nın ısısal eklojit bölüm çizgisi üzerinde yer almaktadır. Bu bileşim üzerine olan deneysel sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Olivinin susuz koşullar altında, ancak 13 kb basınca dek eriyik evresi üstünde kalmasına karşın, artan P_{H_2O} 'ın olivin 27 kb'a ($P_{H_2O} = P_{yük}$) dek eriyik üstünde kalmasını sağlayabildiği anlaşılmaktadır. Bu bileşimde, kuru koşullar altında 15 kb üzerinde granat ve klinopiroksenler eriyiğe yakın evrelerdedir. Bu nedenle ısısal eklojit bölümü yüksek su basınçlarında kesilmektedir. Olivinin birincil kristallenme alanı da, Kushiro ve Yoder'in (1969) de gösterdiği gibi, daha silisli bileşimlere doğru uzanmaktadır. Sorun, ne ölçüde silisli olduğudur?



Şekil 7: Su içeriği farkına göre P_{H_2O} P_{Toplam} koşullarında olivin toleyit ve silisçe doygun toleyit eriyikleri. Taralı bölgeler eriyiklerde ve eriyikler yakınındaki olivin kristallenme alanlarını göstermektedir. Nicholls ve Ringwood (1972, 1973)'un sonuçlarına göre.

Çizelge 4: Nicholls ve Ringwood (1972, 1973)'un deneysel olarak incelediği bileşimler

	Olivin SiO_2 'ce doygun toleyit		Bazaltik andezitler	
	(I)	(II)	(I)	(II)
SiO_2	45,9	51,5	53,7	56,6
TiO_2	0,1	1,8	0,6	0,9
Al_2O_3	14,4	13,8	17,7	17,6
Fe_2O_3	1,0	2,2	2,6	1,9
FeO	11,9	8,9	7,6	5,2
MgO	12,4	9,4	4,3	5,0
CaO	12,9	8,9	11,1	8,1
Na_2O	0,8	2,5	1,8	3,4
K_2O	0,01	0,7	0,4	1,0
Olivin kristallenmesi için en yüksek basınç ($\text{PH}_2\text{O} = \text{Ptoplam}$)	27 kb	20 kb	7 kb	5 kb

Bu sorun doygun toleyit üzerinde yapılan deneylerle tikel olarak yanıtlanmıştır. (Bu toleyit düşük basınçtaki biçiminde serbest kuvars ya da serbest olivin bulundurmaz). Olivin birincil kristallenme alanı suyla doygun koşullar altında 3 kb (kuru)'dan 20 kb'a dek uzanmaktadır. Bu nedenle, bu bileşimdeki bir magma 70 km (20 kb)'ye dek olan cerinliklerde (daha derinlerde değil) pirolitin doğrudan tikel ergimesi ile oluşmuştur. Daha derinde oluşmamasının nedeni ise, eriyiğin uzun süre kalıntı olivinle dengede kalamamasıdır. Önemli bir özellik olarak, olivinin yalnızca küçük bir bölümünün (% 5 - 10) bu magmadan 10 - 20 kb arasında bir basınç altında kristallendiği gözlenmektedir. Bu ise, olivin kristallenmesinin, bu eriyiği çok daha silisli koşullara yönelme yeteneğinin olmadığı görüşünü doğrulamaktadır. Bu olgu bazaltik andezitlerde yapılan deneylerde incelenmektedir (Çizelge 4). Bu deneyler olivinin suyla doygun koşullar altında yaklaşık 5 - 7 kb basınçlara dek eriyik üzerinde kaldığını gösterir. Böylesi magmalar, mantonun yaklaşık 30 km'den daha derinlerde doğrudan tikel ergimesiyle oluşamazlar.

Nicholls ve Ringwood (1973) bu deneylere dayanarak, andezit ve dasit magmalarının (% 60 - 65 SiO_2) pirolit mantosunun yaklaşık 40 km'den daha derinlerde doğrudan tikel ergimesiyle birincil magma olarak oluşabilmelerinin olanaksızlığını düşünmüşlerdir. Bununla birlikte, 70 - 100 km arasındaki derinliklerde suyla doygun koşullar altında tikel ergimeyle olivin toleyitten doygun toleyite dek uzanan bileşimler gösteren magmaların oluşması olasıdır. 70 - 100 km derinlikteki bu magmaların eriyiği, 1 atmosfer'in eriyik evresinin altına düşmektedir (Şekil 7). Sonuç olarak, yükselme nedeniyle yük ve su basınçları azaldığında suyun ayrılması sonucu bu eriyikler kristallenmeye zorlanmış olmalıdırlar. Yüzeiden 30 km'ye değin olan derinliklerde kalıntı eriyik bazaltik andezite ve hatta andezit bileşimine ayrılmışacağından (Nicholls ve Ringwood, 1973; Nicholls, 1973), kristallenme yolları olivin çökmesi alanı içerisinde yer alır. Bu koşullar altında olivinin (+ spinel) kristallenmesi bileşim bakımından bazalt ile andezit (en çok % 58 SiO_2) arasında değişen eriyikler aralığını oluşturur. Böylesi eriyikler ayrılmışlığına ile güçlü demir zenginleşmesini (toleyitik FMA gidişi) belirlerler. Bunlar düşük bolluktaki uyumsuz elementleri, görece olarak ayrılmışlığı nadir toprak düzenlerini bulundururlar ve Ni, Mg, Cr bakımından, okyanus ortası sırtlarının abisal toleyitlerine göre so-

ğurulmuşlardır. Bu magmalar özgül nitelikler bölümünde yer zaman ilişkileri başlığı altında tartışılan ada yayı toleyit dizilerinin tüm özgül niteliklerini kapsamaktadırlar. Bu magmaların ada yayı evriminin ilk aşamasını betimlediğine inanılmaktadır.

Böylesi magmalar derinlerde kapalı düzen koşulları altında kristallenirlerse, olivin ayrılması kalıntı eriyik bileşimlerini yaklaşık % 58 SiO_2 'i aşan silis içeriğine götüremeyecektir. Bu koşullarda olivin eriyikle etkileşme ilişkisine girer ve orta basınçlarda amfibolün, düşük basınçlarda piroksenin yerine alır. Daha ileri bölümlenme taşoluşum kuramları bölümünde amfibolce denetlenen bölümlenme başlığı altında tartışıldığı gibi, dasit ve riyodasit eriyiklerinin oluşumuyla sonuçlanan amfibol \pm piroksenin kristallenmesiyle yönetilecektir. Çok düşük basınçlarda plajyoklas ayrılması oluşur. Bu olgu sırasında riyodasitlerin riyolite ayrılmışlığına neden olmaktadır. Bazalt-andezit-dasit-riyolit magmalarının tümü bu nedenle oluşabilmekte ve ada yayı toleyit dizilerinin iz ve ana element bolluk düzenleriyle tanımlanabilmektedirler (Nicholls ve Ringwood, 1972, 1973). Tonga ve Mariyana yaylarının bu tür bir ayrılmışlığının işleyişi için yetkin örnekler bulunduğu bilinmektedir (örneğin : Ewart ve diğ., 1973).

SUYUN KAYNAĞI

Tartışılan tüm ayrılmışlığı mekanizmaları mantoda derin bir su kaynağı gerektirmektedir. Suyun, batan taşıyıcı levhalar yardımıyla Benioff kuşakları boyunca sokulması çok olası görünmektedir. Bu suyun kaynağının yitik tortullar içerisinde olması olanaksızdır. Mekanik güçlüklerden ayrı olarak, yerkimyasal zorlamalar da özel durumlarda dağılımı magma dizileriyle soğurulan tortul tutarını büyük ölçüde kısıtlamaktadır. Bu nedenle Tonga-Kermadec volkanitlerinde başlangıç izotopik bileşimler üst sınırın yüzde birden çok daha küçük olduğunu göstermektedir (Oversby ve Ewart, 1972).

Bu nedenle, yitik okyanus kabuğunda sulu mineraller bulunduğu için suyun sokulduğu düşünülmektedir. En geçerli modellere göre bu yitik okyanus kabuğunun çoğunlukla bazalt-dolerit, gabro ile tüm bunların başkalaşım türevlerinin (çoğunlukla yeşilistler ve amfibolitler) heterojen karışımından oluşuk olduğuna inanılmaktadır. Mantoya yitim yoluyla yeşilistler amfibolite dönüşürken serbestleyen fazla su susuz mafik kayaların çoğunu amfibolite dönüştürür. Bu olgu suyun

- Ringwood, A. E., 1973, Composition and petrology of the Earth's mantle: McGraw-Hill, New York, Baskıda.
- Ringwood, A. E. ve Green, D. H., 1966, An experimental investigation of the gabbro-eclogite transformation and some geophysical implications: Tectonophysics, 3, 383-427.
- Ringwood, A. E. ve Major, A., 1967, High pressure reconnaissance investigations in the system $MgSiO_3$ - MgO - H_2O : Earth Planet. Sci. Lett., 2, 130-133.
- Sclar, C. B., Carrison, L. C. ve Stewart, O. M., 1967, High pressure synthesis of a new hydroxylated pyroxene in the system MgO - SiO_2 - H_2O (Özet): Trans. AGU, 48, 226.
- Taylor, S. R., 1967, The origin and growth of continents: Tectonophysics, 4, 17-34.
- Taylor, S. R., 1969, Trace elements chemistry of andesites and associated calcalkaline rocks: Bull., Dept. Geol. Min. Resources, State of Oregon, 65, 43-63.
- Wager, L. R. ve Deer, W. A., 1939, Geological investigations in East Greenland III. The petrology of the Skaergaard Intrusion. Kangerdlugssaq, East Greenland: Med. om Gronland, 105, 1-352.
- Wilson, J. T., 1954, The development and structure of the crust: Kuiper, G. P., ed., The Earth as a planet de: Chicago Univ. Press, 138-214.
- Yamamoto, K. ve Akimoto, S., 1973, High pressure and high temperature investigations in the system MgO - SiO_2 - H_2O : Baskıda.
- Yoder, H. S. ve Tilley, C. E., 1962, Origin of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rocks systems: J. Petrology, 3, 342-352.