

Ada Yayı Dizgelerinin Petrolojik Evrimi^(*)

A. E. RINGWOOD

Öz

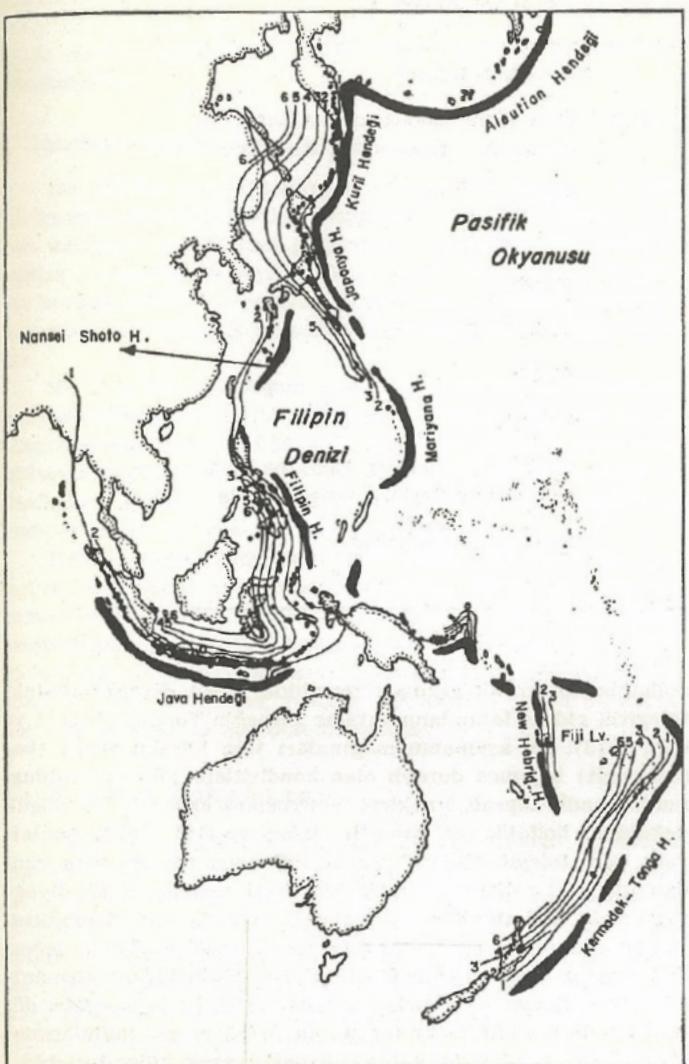
Ada yayı dizgelerinin gelişimi ile ilgili en önemli petroloji sorunu bazalt-andezit-dasit-riyolit volkanik takımının kökenidir. Bu takımın özgül nitelikleri yazda yeniden gözden geçirilmektedir. Bu nitelikler etkin volkanların Benioff kuşaklarına göre dağılımlarını, magmaların kimyasal bileşim ve bölümleme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

Deneysel petrolojideki en son araştırmalar volkanik takımın çeşitli özgül niteliklerinin nedeni olabilecek üç bölümlemeye bağlı denetlenmeyi (fractionation control) ortaya koymaktadır. Bu denetlemeler sunlardır; amfibolce denetlenen bölümleme (amphibole-controlled fractionation), eklojite denetlenen bölümleme, yüksek su buharı basıncı altında pirolit mantonun doğrudan tikel ergimesi (partial melting). Bu süreçlerin uygulanışı yazda gözden geçirilmektedir. Amfibolce denetlenen bölümleme 100 km'den daha sık derinliklerde olmaktadır. Bu bölümleme K/Na ve nadir toprak elementi bolluklarındaki küçük bir değişiklikle, kahntı eriyikler arasında kalkalkali bir eğitime neden olmaktadır. Aynı biçimde, eklojite denetlenen bölümleme de kalkalkali eğise neden ol-

maktadır. Ancak bu süreç K/Na oranları ve nadir toprak elementlerinin bölümlemesindeki artışın eşliğinde, olasılıkla 100 — 150 km arasındaki derinliklerde olmaktadır. Yüksek P_{H_2O} altında mantonun kısmı ergimesi bazalt magmasının 70 — 100 km arasındaki derinliklerdeki oluşumunun nedeni olarak gösterilmektedir. Yükselme nedeniyle bu magmalar çoğunlukla olivinin kristalleşmesiyle bazaltik andezit ve andezit bileşimlerine bölümlenir. Oluşan eriyikler toleyitik ayrılma (differentiation) eğisi 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 ayrılmışa ugramaktadır. Okyanus kabuğu 100 — 150 km'lik derinliklere yiterken, yüksek P_{H_2O} yapısına su almış magnezyum silikatları yüksek basınç türevinin ve serpentinitin sularını yitirmeleriyle korunmaktadır. Kuvars eklojitolu okyanus kabuğunu tikel ergimesi riyodasit magmasını oluşturur. Bu magmalar piroksenit oluşturmak için üstteki pirolit mantosu ile etkileşmektedir. Piroksenit diyapırıcıları Benioff kuşağından yukarı doğru yükseli-

(*) 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 egrileriyle, volkanlar siyah noktalara gösterilmiştir. (GSA'nın izniyle Oxburgh ve Turcotte, 1970'den).

lir. Bu diyapirler tikel olarak ergiyerek eklojite kristaljenmesi (80 — 150 km) ve amfibol kristallenmesi (30 — 100 km) ile böülümenme yoluyla magma olırmaları olırmaktır, bunun sonucu olarak ada yayı gelişiminin kalkalkalı aşaması gerçekleşmektedir.

Yaklaşık 150 km aşağıya batan taşyuvar levhalarındaki kalıntı, ergimez eklojite ve peridotit dönüşümsüz bir biçimde ayrımlılmakta ve okyanus ortası sırtlarındaki bazalt magmalarının oluşumuna hıç bir zaman katılmamaktadır. Son olarak, bütünleyici ayrımlılıkma ada yayısının gelişerek birleşmesiyle ve andezitik volkanik takımın eklenmesiyle zaman içerisinde gelişen kita kabuğunun yukarıda tartışıldığı gibi olırmasıdır. Mantonun hacminin yaklaşık % 30 — 60'ının bu tek yönlü (irreversible) ayrımlılıkma sürecinden geçtiği düşünülmektedir.

Ada yayısının evrimi ile ilgili olasılıkla en önemli petroloji sorunu bu bölgelerin tanıtmanı olan volkanik kayaların

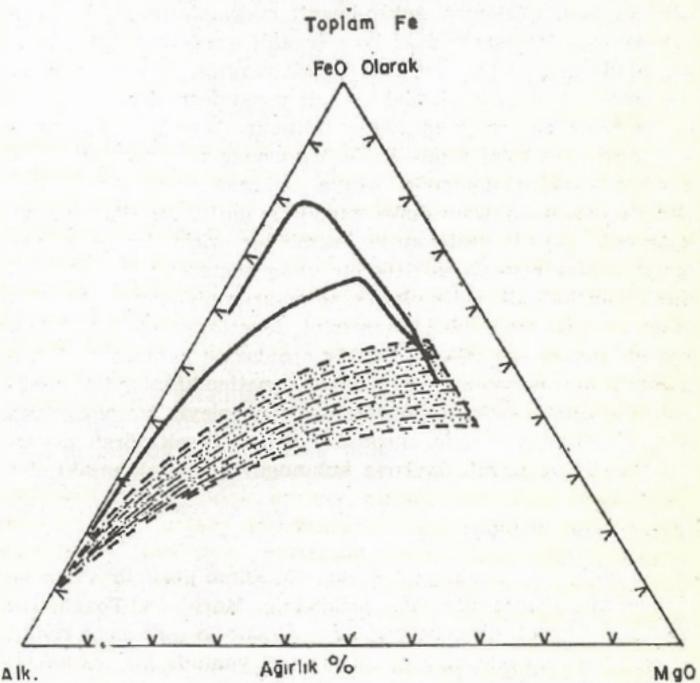
kökeni ile ilişkilidir. Bu kayalar "dağ oluşum volkanik dizileri" diye ortak bir adla anılan bazalt-andezit-dasit-riyolit takımını kapsamaktadır. Ada yayları ana olarak böylesi kayalardan, bunların plütonik karşılıklarından ve birden çok kez devreye girme sonucu gelişmiş türevlerinden oluşmaktadır. Mantodan türemiş dağılışum magma dizisinin üyelerinden oluşan ada yaylarının kenar eklenmesi yoluyla jeolojik zaman içerisinde kıtaların oluştuğu ussal bir düşünüş olarak tarihi sürülmektedir. Eğer bu sav doğruya, dağılışum volkanik dizilerinin taşılışlarının yerbilimlerinde çok önemli bir sorun olduğu açıklıktır. Bu dizilerin pek çok özgül niteliği vardır. Bu niteliklerin herhangi bir taşılışum (petrogenesis) kuramıyla açıklanması gereklidir. Aşağıda bu nitelikler tartılmaktadır.

ÖZGÜL NİTELİKLER

Alansal Dağılım

Dağılışum türü etkin volkanizma tanıtmanı bir biçimde okyanus hendekleri ve taşyuvar yitme kuşakları ile ilişkilidir (Şekil 1).

Olağan olarak Benioff kuşakları listede yer alan volkanlar 80 — 150 km'lik yüksekliklerdedir. Bu ilişkiler dağılışumu volkanik dizilerinin kökeninin, Benioff kuşakları yakınında oluşan süreçlere bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.



Sekil 2: Tanıtman toleyitik ve kalkalkalı gidişleri gösteren (toplam demir, FeO olarak; MgO; Na₂O + K₂O) FMA diyagramı. Toleyitik bölge Skaergaard Girmesi (Wager ve Deer, 1939) ve Thimgmuli volkanında (Carmichael, 1964) gözlemlenmiş ayrımlılıkma gidişleriyle belirlenmektedir. Kalkalkalı bant Cascade, Aleutian ve Yeni Zelanda kalkalkalı bölgelerindeki magmaların gösterdiği ayrımlılıkma gidişlerini kapsar.

Cizelge 1: Ada yayı toleyit ve kalkalkali takımlarının özgül nitelikleri

	Ada yayı toleyitleri	Kalkalkali takımı
Örnekler	Mariyana, Tonga, İzu, Güney Sandviç yolları	Batı Hint, Endonezya, Aluetianlar, Japonya, Kamçatka, Yeni Zelanda
Aşama	erken	geç
Başat magma	bazalt, bazaltik andezit	andezit
SiO_2 değeri	% 55	% 60
Bölümleme	Toleyitik	kalkalkali
Cr, Ni, Mg, Ti	düşük	düşük
K/Na	düşük	yüksek
Nadir topraklar	bölümleme memiş, kondiritik	güçlü bölümleme memiş 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 Bölümleme Gidişleri

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

FMA diyagramı dağoluşum volkanik dizilerinin ve kabuk ortamında kristalleşen gabro-bazalt magmalarının bölümleme davranışları arasındaki bazı önemli ayrılıkları ortaya çıkarmaktadır (Şekil 2). Gabro-bazalt magması (örneğin Skærgaard) erken aşamalardaki demir zenginleşmeleriyle tanımlanan toleyitik bir gidiş göstermektedir. Bu olgu denge eriyiklerinden çok daha düşük Fe/Mg oranları olan olivinler ve piroksenlerin ayrılmalarıyla ortaya çıkmaktadır (Çizelge 3). Öte yandan dağoluşum dizisi genellikle mafikten alkali ucuna uzanan bir seri kaplayan ve önemli bir erken demir zenginleşmesi göstermeyen değişik bir gidiş gösterir (Şekil 2). Bu durum kalkalkali gidiş olarak adlandırılmaktadır. Bölümlemenin, toleyitlerin bölümlemesini denetleyen olivinlerle piroksenlerden daha yüksek Fe/Mg oranlarına sahip olan ferromagnezyum evresinin ayrılmasıyla denetlendiğini göstermektedir. Bundan başka dağoluşumu dizisi toleyit magmalarının kristalleşmesi sırasında oluşturan daha yüksek göreli değerlerde geçiş ve asidik tiyelerin bulunuşuya tanımlanmaktadır.

Yer-Zaman İlişkileri

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

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

volkanizmasının ilk aşaması genellikle FMA diyagramındaki toleyitik gidişle tanımlanmaktadır (örneğin Tonga) (Ewart ve dig., 1973). Bu aşamanın magmaları tüm bileşim sırası (bazalt-dasit) boyunca duraylı olan kondiritlere göre ayırmamış 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 diyagramındaki kalkalkali gidiş gösteren lavlarla tanımlanmaktadır. Bu magmalar belirli bir SiO_2 içeriğine göre yüksek değerde uyuşmaz element (örneğin K, U, Ba, Nadir toprak elementleri) bolluklarına sahiptirler ve bölümleme memiş nadir toprak düzenlenmeleri (hafif nadir toprak elementlerince zenginleşmiş) gösterirler. Bunlar 'kalkalkali diziler' olarak adlandırılabilirler.

Bu evimsel gelişme tüm ada yaylarında açoğ olarak görülememekle birlikte, yazar bu gelişimin, taşoluşum kuramı için önemli bir sınır koşulu ortaya koymakta yeterli genellik ve gerçeklige sahip olduğunu inanmaktadır.

Bileşim-Derinlik İlişkileri

Dağoluşum türü magmaların Benioff kuşağı üstündeki uzaklığa da uygun olarak, hendeften uzaklaşıkça 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 SiO_2 içeriğine göre) özgül potasyum içerikleri diyagramda Benioff kuşağına göre volkanların derinliklerine göre gösterildiğinde, derinliğe bağlı olarak potasyumun artması biçiminde belirgin bir ilişki (noktalar biraz saçılımış durumdaysa da) gözler önüne serilmektedir (Şekil 3). Yazarlar bu ilişkiye Benioff kuşağı yakınındaki taşoluşum ve fiziko-kimyasal süreçler arasındaki bağlantıyi (örneğin ergime dengesi üstündeki basınç denetimi) açıklamada kullanılmaktadır.

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

egilimindedir (Taylor, 1969; Gill, 1970). Bu nedenle bilesim-de-rinlik ilişkisi yukarıda tartışılan K'ca zengin kalkalkali dizilerin K'ca yoksul ada yayı toleyit dizilerine göre daha derinlerde oluşabildiği biçimindeki evimsel ilişki ile bağlantılı görülmektedir.

1 Atmosfer'deki Ergime İlişkileri

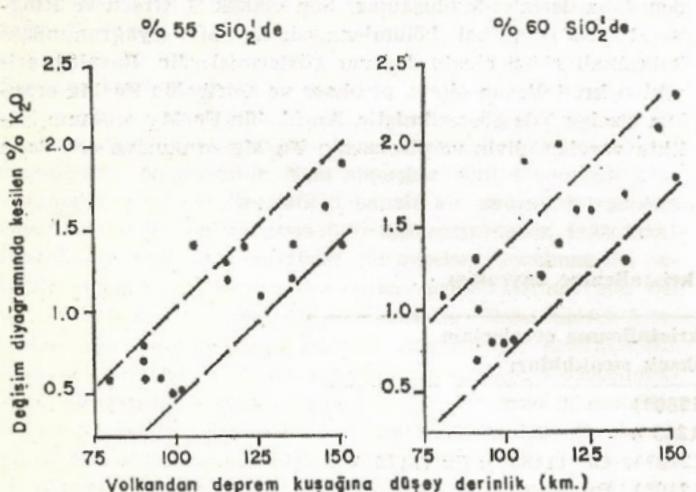
Bu ilişkiler kalkalkali kayalar dizisi için Çizelge 2'de gösterilmiştir. Belirgin özellik plajyoklas kristallenmesinin yüksek sıcaklığı ve yalnızca plajyoklasın kristallendiği geniş sıcaklık aralığıdır. Bu olgu özellikle dasitte belirgindir. Plajyoklas burada 1275°C'da ortaya çıkmakta ve piroksenle birleşmeden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

Bu ilişkiler dağoluşum volkanik dizilerinin, kristallenme ayrımlaşması yoluyla bir atmosfer basınç altında ana bazalt magmasından (parental basaltic magmas) gelişmiş olma olasılıklarını büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Andezit ve dasit gibi yüksek normatif plajyoklaslı kayalar bazallaşıdositası arasında ısisal bir engel oluştururlar.

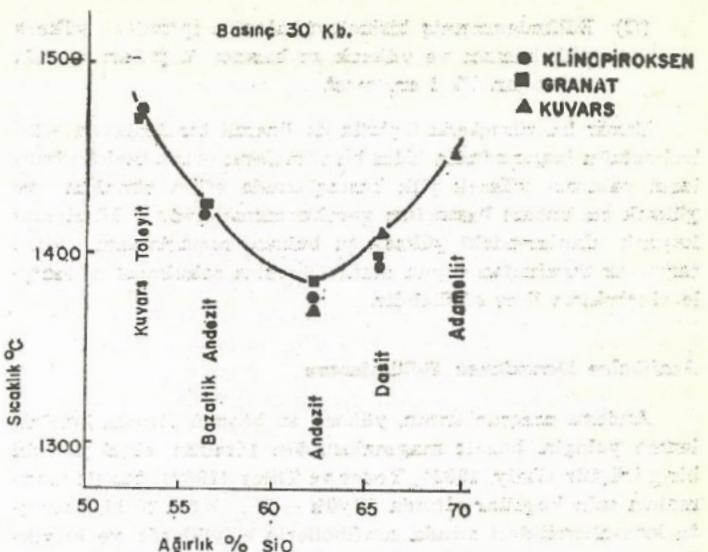
Kristal-eriyik bölümlemesiyle dağoluşum volkanik dizilerinin taşoluşunu açıklama amacını güden herhangi bir varsayımin, ferromagnezyum mineralerine göre plajyoklasın kristallenme alanını daraltmak igin bir mekanizma gerektirdiği kesindir. Göreceğimiz üzere bu mekanizma yüksek su basinci, yüksek su basinci, yüksek yük basinci ya da bu etkenlerin bilesimiyle oluşturulabilmektedir.

TAŞOLUŞUM KURAMLARI

Dağoluşum volkanik dizilerine ait daha önceki yayınlarında öne sürülmüş bir çok taşoluşumu kuramı vardır. Bu kuramlar içerisinde önceden varolan sialik kayalarının ergimesi, kristalin sialle ya da tortullarla bulaşmış (contamine) bazalt magmalarının ayrımlaşması, melezleşme (hybridism), manyetin büyük ölçüde çökeltmesi ile sonuçlanan yüksek oksijen basınçları altında bazalt magmalarının yüksek değerde ayrımlaşma kristallenmesi sayılabilir.



Şekil 3: Yayların altındaki Benioff kırınlıklarına karşı 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 kristallenmenin değerlendirilen eriyik sıcaklıkları ve dizilişi. (Contr. Miner. Petr.'nin izniyle T. Green ve Ringwood, 1968'den).

Bu süreçler yayınlarında 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 dağoluşum magma dizilerinin son taşoluşumlarının nedeni olmadığı gittikçe açıklik kazanmaktadır. Genel olarak uygulandığında her bir mekanizma bir dizi engellemeyle karşılaşır. Bu güçlüklerin bir bölümü bir çok ada yayının kıtalardan uzak okyanus alanları içerisinde (önceki varolan yağlı kita kayaları olmaksızın) gelişmeleridir (Gorshkov, 1962). Taşyuvar yitim kuşakları ile kökensel ilişkisinin kanıtı ve Sr izotop çalışmaları ile birleştirilen bu gözlem, bu magmaların en son kaynağının mantoda aranması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Yazارın gabro-diyorit-granodiyorit-granit plütonik dizilerini değil, yalnızca dağoluşum magmatik topluluğunun volkanik üyeleriini tartıştığı okuyucuların gözüne kaçırmayacaktır. Gabro-diyorit-granodiyorit-granit plütonik dizisi genellikle, derinlerde kristalleşen dağoluşum türül birincil magmaları tanımlar ve bu nedenle dağoluşum volkanik dizisinin plütonik karşılığıdır. Tüm bunlara karşın diğer bir çok plütonik kayanın kabuk ortamındaki ağır başkalışım ve tikel ergimesiyle (genellikle, büyük bölümü dağoluşum volkanik kayalarından en son olarak türemiş olan tortullardan) oluşturularını gösteren bir çok kanıt vardır (Dickinson, 1962). Bu nedenle dağoluşum magmatik topluluğunun plütonik türleri olasılıkla, volkanik üyeleri denilen daha ileri derecede çok kökenlidir (polygenetic). Volkanik üyeleri için yukarıda benimsenmeyen mekanizmaların bazıları bu durumda önemli olabilir.

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

- (A) Amfibolün kristallenmesi ya da amfibolitin tikel ergimesiyle denetlenen, bazalt magmasının bölümlemesi.
- (B) Eklojitin kristallenmesi ya da kuvars eklojitin tikel ergimesiyle denetlenen, bazalt magmasının bölümlemesi.

- (C) Bölümlememis birincil mantonun (pirolit) yüksek yük basinci ve yüksek su basinci koşulları altında doğrudan tikel ergimesi.

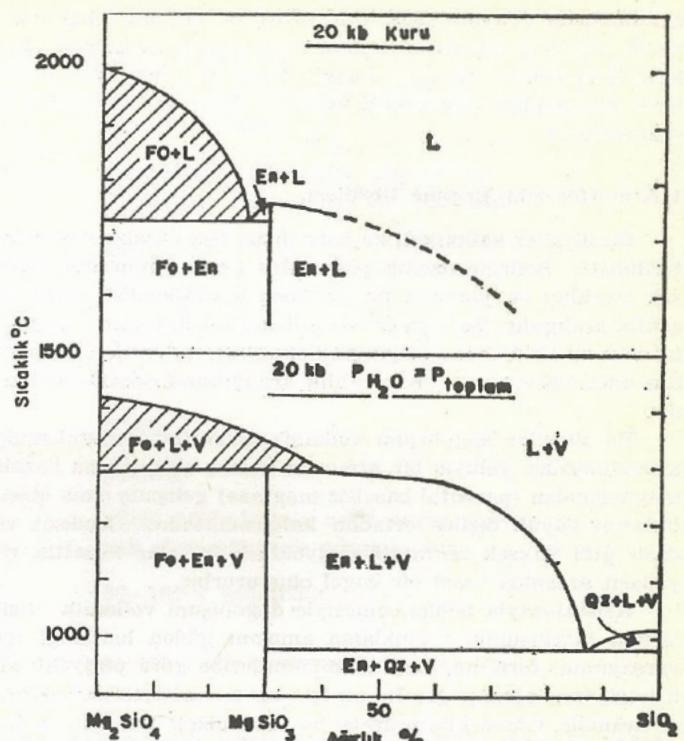
Yazar bu süreçlerin üçünün de önemli tamamlayıcı etkileri olduğu inancındadır. Tüm bu süreçlerin ortak özelliği bunların yalnızca yüksek yük basınçlarında etkin olmaları ve yüksek su buhari basınçları gerektirmemeleridir. Mantonun kaynak alanlarındaki yüksek su buhari basınçlarının yitik taşıyuvardan suyun manto içersine sokulması nedeniyile oluşturukları ileri sürülebilir.

Amfibolce Denetlenen Bölümleme

Andezit magmalarının, yüksek su basinci altında kristalleme yoluyla bazalt magmalarından türediği oldukça eski bir görsüttür (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 dağılışum volkanik dizilerinin taşoluşumlarına uygulayamamışlardır.

1968'de T. Green ve Ringwood amfibolce denetlenen kristallemenin dağılışum volkanik dizilerini oluşturabilme olasılıklarını araştırmak istemişlerdir. Deneyel çalışmalarla 3-5 kb'lık su buhari basinci ve 10-20 kb'lık yük basınçları altında bazalt-bazaltik andezit, dasit ve diyodasit kristallendirmiştir. Eriyik ve eriyiğe yakın evrelerin bileşimleri ölçülmüştür. Bu işlem kalıntı eriyik bileşimlerini hesaplanmış olarak alıp, niceliksel bölümleme gidisleri elde edilerek gerçekleştirilmişdir. Böylece amfibolün alanı bazalt-andezit bileşimleri arasındaki eriyikler üstünde ve yakınında bulunmuştur. Amfibol %40 SiO_2 içeriğyle silisce yoksul olarak bulunmaktadır. Bazaltın 10-20 kb arasındaki bilinen koşullarda amfibol \pm piroksen ayrılmasıyla andezit ve dasit bileşimlerine bölümendiği açıklığı 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 sürdürülmiş ve yukarıdaki sonuçlar büyük ölçüde doğrulanmıştır (T. Green, 1972; T. Green ve Ringwood, 1972; Holloway ve Burnham, 1972). Holloway ve Burham (1972) da 5-10 kb basınçlarda amfibolitin tikel ergimesinin küçük bir bölümünün dasit magmasını oluşturduğunu ortaya koymuştur.



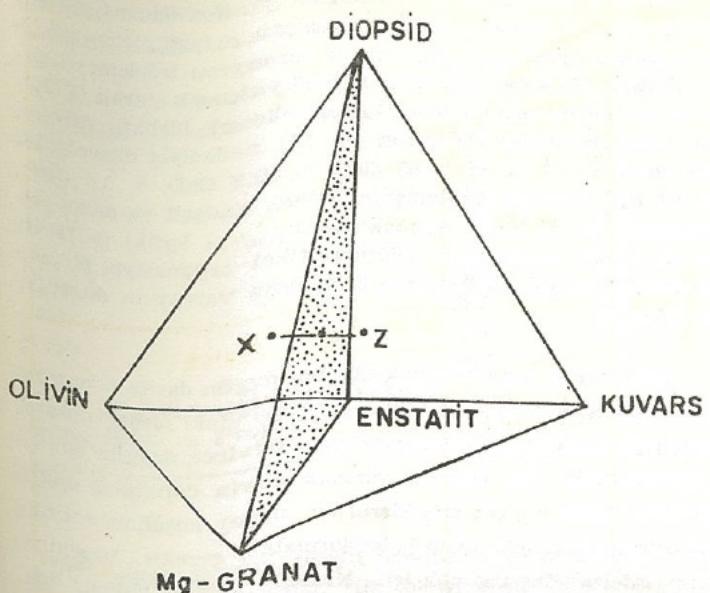
Şekil 5: 20 kbar (susuz) ve 20 kbar ($\text{Pyük} = \text{PH}_2\text{O}$)'daki $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ dizesi. Kushiro ve Yoder, 1969'a göre.

Amfibolce denetlenen böylesi bir bölümleme bazı özel özelliliklere sahiptir. Amfibolün K/Na oranı kristallendiği eriyiğin K/Na oranı ile bağlantılı olduğundan, bu nitelikteki bölümleme kalıntı eriyiği ya da tikel eriyiğin K/Na oranını büyük ölçüde değiştirmeyecektir. Benzer nedenlerle, amfibolce denetlenen bölümleme nadir toprak elementlerini bölümlemeyecektir. Bundan başka, amfibolün yüksek basınçlardaki duraysızlığı ve granat + piroksen + $\text{H}_2\text{O}'ya$ dönüşümü nedeniyle (D. Green ve Ringwood, 1967; Lambert ve Wyllie, 1968; Şekil 8), amfibolce denetlenen böylesi bir bölümleme 90 - 100 km'den daha derinlerde oluşamaz. Son olarak T. Green ve Ringwood (1968) amfibol bölümlemesinin FMA diyagramındaki kalkalkali gidişi oluşturduğunu göstermiştir. Bazaltik eriyikten kristalleşen olivin, piroksen ve amfibolün Fe/Mg oranları çizelge 3'de gösterilmiştir. Amfibolitin Fe/Mg oranının birlikte varolan olivin ve piroksenin Fe/Mg oranından çok daha

Çizelge 2: Batı Hint kalkalkali kayalar dizisinin kristalleme davranışları

No	Kaya	% SiO_2	Ana kristalleme evrelerinin en yüksek sıcaklıklar
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	Eiyotit dasit	69.9	PI (1275°), PX (1180°)

Brown ve Schairer (1968)'den. PI : plajyoklas, OL : olivin, PX : piroksen



Sekil 6: 25 kbar'dan daha yüksek basınçlarda mantodaki ergime tarzını gösteren diyagram. Bellitilen diopsid-enstatit, Mg granat düzlemi, kuru koşullar altında bir ıssal bölüm oluşturur ancak, yüksek su basınçlarında birincil olivin alanına geçen eklojıt düzlemdir.

yüksek olduğu ve eriyiğin Fe/Mg oranına benzettiği görülmektedir. Bu nedenle amfibollerin ayrılması olivin ve piroksen kristalleşmesi ile gelisibilecek toleyitik erken demir zenginleşmesi gelişini oluşturmamaktadır.

Eklojite Denetlenen Bölümleme

Dağolusum türü bir çok volkan Benioff kusağı üzerinde 100 km'den daha büyük bir yükseltide yerleşmiştir. Bu magmalar Benioff kusağı yöresinden türemişlerse, bu derinliklerdeki basınçlar (30 - 50 kb) amfibollerin duraylılığının gegerli olması için çok yatkintır ve bölümleme süreçleri etken olması gereken amfibollerden daha başka evrelerle düzenlenmektedir. T. Green ve Ringwood (1968) başlangıç olarak susuz koşullarda 20 - 40 kb arasında dağolusum volkanik kayaları dizisinin kristalleşmesini araştırmışlardır. Eriyiğe yakın evrelerin bileşimleri, kalıntı eriyiklerin ayrımlılışma gelişlerinin nesilksel olarak saptanmasını benimseyerek, elektroprob mikroanalizlerle ölçülmüştür. Bazi sonuçlar sekil 4 üzerinde gösterilmiştir. 20 kb'in üzerindeki bazalt ve andezit bileşimleri arasındaki bölümleme granat ve klinopiroksenin (eklojitin) kristalleşmesiyle denetlenmiştir. Bu evrelerin ayrılmasının bazaltik andezitten, andezit bileşimine ayrımlılışmak için bir ana bazalt gerektirdiği ortaya çıkmıştır. Daha asidik bileşimlere ayrımlılışma çok geniş birincil kuvars kristalleşme alanıyla engellenmiştir (Sekil 4). Andezit bileşimi dizilimdeki ıssal 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 oluşturabilecektir.

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 incelemiştir. Sekil 4'ün daha asidik bileşimlerinde kuvars alanının aşırı düşüşü ortaya çıkmıştır. Demirce zengin granat, kuvars yerine andezit, dasit ve riyodosit bileşimli eriyik üzerinde görelî düşük sıcaklıklarda (900 - 1100°C) kristalleşmeye başlamıştır. Kristalleşme dengesinin denetlenmesinde granatın piroksene göre önemi eriyikler daha çok asidikçe artmıştır. Riyodosite dek uzanan sürekli bir eriyik bileşimi dizisinin bu sulu yüksek basınç koşulları altında granat ve klinopiroksenin bölümlemeyle oluşabildiği açıklik kazanmıştır. Sonuçlar da sulu yüksek basınç koşulları altında kuvars eklojitin kütük değerdeki tikel ergimesinin riyodosit ve hatta riyolit magması oluşturacağının doğrulamaktadır. Bunun yanısıra daha büyük tikel ergime dasit ya da andezit oluşturmaktadır.

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

Eklojitle denetlenen bölümleme eriyik ayırmılışma kimyasında yansyan bazı özgül nitelliklere sahiptir. Kristal evresindeki düşük silis içeriği nedenile 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 nedenile kalıntı eriyikler toleyitik bir gidisten çok kalkalkali bir gidis göstermektedir. (T. Green ve Ringwood, 1968). Eklojilik eriyiğe yakın piroksenler potasyum değil de, büyük değerde sodyum içeriğli olarak bulunmaktadır. Bu nedenle eklojıt bölümleme kalıntı eriyiilerin Na/K oranlarında azalmaya neden olur. Aynı biçimde, granat bileşeni hafif nadir toprakları soğurmakszız ağır nadir toprakları magmadan geriye çekerek nadir toprakların güçlü bölümleme sine neden olur. Bu etkiler kuvars eklojitin sulu koşullar altında düşük değerdeki tikel ergimesinin ortaya çıkışını yerde daha çok güçlü olarak ortaya çıkarmaktadır. 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 uyuşmaz elementlerin kaynağına göre zengin oluşuyla tanımlanmaktadır.

Pirolitin Yüksek P_{H_2O} 'da Tikel Ergimesi

$P_{H_2O} = \text{Pyük} = 20$ kb'daki $\text{MgO-SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ dizgesi Kusohiro ve Yoder (1969) tarafından incelenmiştir. Bu araştırma-

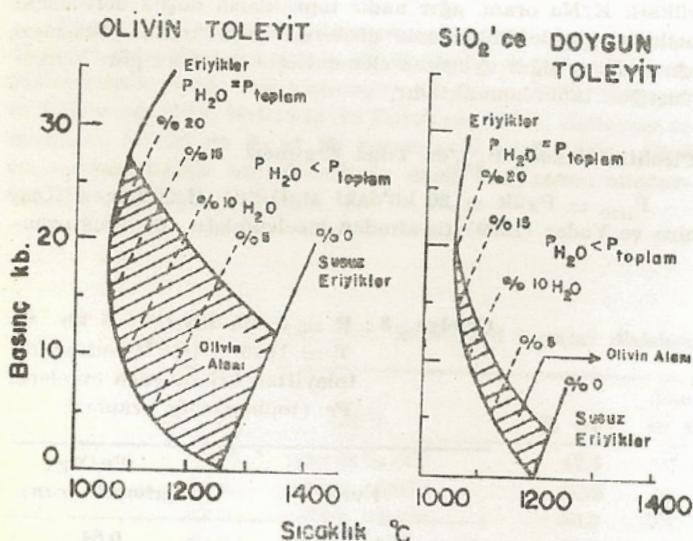
Çizelge 3 : $P = 8$ kb, $\text{PH}_2\text{O} = 5$ kb ve $T = 1000^\circ\text{C}$ (QFM buffer)'da toleyitten kristalleşen evrelerin Fe (toplamlı)/Mg oranları

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

Holloway ve Burnham (1972)'dan.

cilar $MgSiO_3$ 'in sulu koşullarda forsterit + silisce aşırı doygun bir eriyik olarak ergidiğini, oysa aynı (20 kb'lık) basınçta kuru koşullarda $MgSiO_3$ 'in uyusan (congruent) bir biçimde eridiğini görmüşlerdir (Şekil 5). Yüksek su buhari basincının forsteritin birincil alanının $MgSiO_3$ bilesimi boyunca genleşmesine neden olduğu görülmektedir. Mg_2SiO_4 ile $MgSiO_3$ arasındaki bir bilesimin bölümlenme kristallenmesi, bu nedenle (forsteritin etkime noktasında, ya da daha önce ayrılmış durumunda) silisce 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 varsayıma göre andezit ve dasit magmaları 70-100 km'lik derinliklerdeki yüksek su basınçları (20 - 30 kb) altında pirolitin tikel ergimesiyle doğrudan oluşmuşlardır.

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



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

Kushiro ve diğ. (1972) bir lerzolit yumrusunu tikel ergiterek ($P_{H_2O} = Pyük = 26$ kb) ve oluşan eriyiğin elektronprob mikroanaliz yöntemiyle ölçerek bu varsayımi irdelemeye çalışmışlardır. 26 kb ve 1190°C'da bütünü yaklaşık olarak % 20'si kalıntı olivin, ortopiroksen, klinopiroksenle birlikte varolan bir cama ergimistir. Su içeriği (% 13) nedeniyle düzenlenmeden sonra susuz camın % 68 SiO_2 , % 10.2 CaO, % 0.6 MgO, % 1.1 FeO içeriği görülmüştür. Sonuç, andezit ve dasit eriyiklerinin 20 - 30 kb'lık basınçlarda ($P_{H_2O} = Pyük$) peridotit ya da pirolit mantosunun doğrudan tikel ergimesiyle birincil magmaalar olarak oluşturularını ileri süren varsayımları doğrular niteliktedir.

Silis içeriği dışında eriyik bilesimi özgün dasite benzemektedir. Eriyik, olivinin etkime noktasındaki pirolit mantosunun tikel eriyiğini betimlemektede, olivince doygun olması gerekmektedir. Bu koşulun yanı sıra olivin doruguuna doğru görülen bilesimlerdeki eriyiklerin bu deney koşulları altında sıvı evreler üzerinde olivin bulundurmaları gereklidir. Bu sonuçların irdelemesini yapmak için, Nicholls (1973), bilinen bilesimli (Kushiro ve diğ., 1972) ancak % 5'lik olivinin eklenmesiyle değişmiş bir dasit camını oluşturmuş ve $P_{H_2O} = Pyük = 26$ kb'daki kristallenme davranışını incelemiştir. Eriyik evresi olivin değil de, klinopiroksen olarak ortaya çıkmıştır. Eriyik sıcaklığı 940°C'dır. Böyle bir eriyik kesinlikle olivinle dengede olamaz. Ayrıca, 1190°C'daki denge koşulları altında lerzolitin tikel ergimesiyle olugamaz.

Ayrılığın nedenleri pirolit ve ilgili bilesimler 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)'ne elde edilmiştir. Silisce zengin eriyiklerin sönme sırasında denge eriyigidenden olivin \pm amfibolün hızla, yarı duraklı kristallenmesiyle oluştuğu ortaya çıkmıştır. Bu olay 10 kb üzerinde yaygın olarak görülür ve ultramafik bilesimler üstünde yapılan doğrudan tikel ergime deneyleriyle denge eriyiği bilesimleri elde edilmesinde büyük güçlükler doğar.

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

Seçilen olivin toleyit bilesimi (Çizelge 4) Şekil 6'nın ısisal eklojitten bölüm çizgisi üzerinde yer almaktadır. Bu bilesim üzerine olan deneyel sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Olivinin susuz koşullar altında, ancak 13 kb basınçta dek eriyik evresi üstünde kalmasına karşın, artan P_{H_2O} 'nın olivinin 27 kb'a ($P_{H_2O} = Pyük$) dek eriyik üstünde kalmasını sağlayabildiği anlaşılmaktadır. Bu bilesimde, kuru koşullar altında 15 kb üzerinde granat ve klinopiroksenler eriyiğe yakın evrelerdedir. Bu nedenle ısisal eklojitten bölüm yüksek su basınçlarında kesilmektedir. Olivinin birincil kristallenme zamanı da, Kushiro ve Yoder'in (1969) de gösterdiği gibi, daha silisli bilesimlere doğru uzanmaktadır. Sorun, ne ölçüde silisli olduğunu söylemektedir?

Cizelge 4: Nicholls ve Ringwood (1972, 1973)'un deneyel olarak incelediği bileşimler

	Olivin toleyit	SiO_2 'ce doygun toleyit	Bazaltik andezitler (I)	Bazaltik andezitler (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 biçimde serbest kuvars ya da serbest olivin bulundurmaz). Olivinin 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 derinliklerde (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 eriyiğin çok daha silsilî koşullara yönelikne yeteneğinin olmadığı görüşünü doğrulamaktadır. Bu olgu bazaltik andezitlerde yapılan deneylerde incelenmektedir (Cizelge 4). Bu deneyler olivinin suyla doygun koşullar altında yaklaşık 5 - 7 kb basınçlara dek eriyik üzerinde kaldığını gösterir. Böylece magmalar, mantonun yaklaşık 30 km'den daha derinlerde doğrudan tikel ergimesiyle olugamazlar.

Nicholls ve Ringwood (1973) bu deneylere dayanarak, andezit ve dasit magmalarının (% 60 - 65 SiO_2) pirolit mantonun yaklaşık 40 km'den daha derinlerde doğrudan tikel ergimesiyle birincil magma olarak olusabilmelerinin olaksızlığını düşünlüyorlardı. Bununla birlikte, 70 - 100 km arasındaki derinliklerde suyla doygun koşullar altında tikel ergimeyle olivin toleyitten doygun toleyite dek uzanan bileşimler göstergen magmaların olması olasıdır. 70 - 100 km derinlikteki bu magmaların eriyiği, 1 atmosfer'in eriyik evresinin altına düşmektedir (Şekil 7). Sonuç olarak, yükselseme nedeniyle yük ve su basınçları azaldığında suyun ayrılması sonucu bu eriyikler kristallenmeye zorlanmış olmalıdır. Yüzeyden 30 km'ye dek olan derinliklerde kalıntı eriyik bazaltik andezite ve hatta andezit bileşimine ayırmışlaşacağından (Nicholls ve Ringwood, 1973; Nicholls, 1973), kristallenme yolları olivin çökelmesi alanı içersinde yer almaktadır. Bu koşullar altında olivinin (+ spinel) kristallenmesi bileşim bakımından bazalt ile andezit (en çok % 58 SiO_2) arasında değişen eriyikler aralığını oluşturur. Böylece eriyikler ayırmışlaşma ile gılçılı demir zenginleşmesini (toleyitlik FMA gidişi) belirlerler. Bunlar düşük bollukta uyusmaz elementleri, görelî olarak ayırmışlaşmış nadir toprak düzenlerini bulundururlar ve Ni, Mg, Cr bakımından, okyanus ortası sırtlarının abisal toleyitlerine göre so-

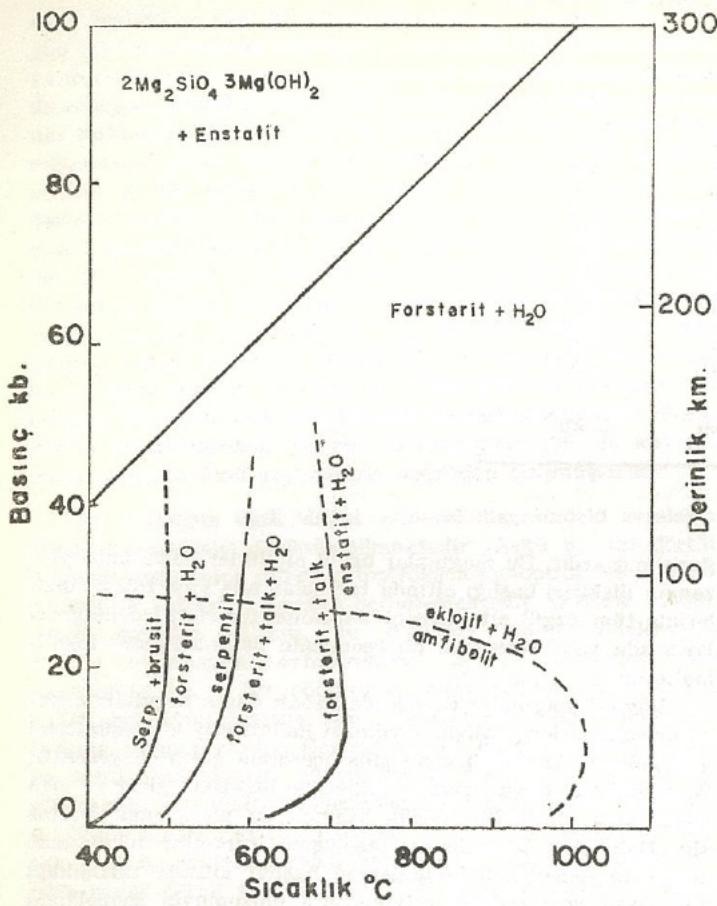
ğurulmuşlardır. Bu magmalar özgül nitelikler bölümünde zamanlı ilişkileri başlığı altında tartışılan ada yayı toleyit dizilerinin tüm özgül niteliklerini kapsamaktadır. Bu magmaların ada yayı evriminin ilk aşamasını betimlediğine inanılmaktadır.

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 bölümleme taşoluşum kuramları bölümünde amfibolce denetlenen bölümleme başlığı altında tartışıldığı gibi, dasit ve riyodasit eriyiklerinin oluşumuyla sonuçlanan amfibol - piroksenin kristallenmesiyle yönetilecektir. Çok düşük basınçlarda plajyoklas ayrılması olur. Bu olgu sırasında riyodasitlerin riyolite ayırmışlaşmasına neden olmaktadır. Bazalt-andezit-dasit-riyolit magmalarının tümü bu nedenle olusabilmekte ve ada yayı toleyit dizilerinin iz ve ana element bolluk düzenleriyle tanımlanabilmektedirler (Nicholls ve Ringwood, 1972, 1973). Tonga ve Mariyana yaylarının bu tür bir ayırmışlaşmanın işleyisi için yetkin örnekler sunduğu bilinmektedir (örneğin : Ewart ve diğ., 1973).

SUYUN KAYNAĞI

Tartışılan tüm ayırmışlaşma mekanizmaları mantoda derin bir su kaynağı gerektirmektedir. Suyun, batan taşıyuvar levhalar yardımıyla Benioff kuşakları boyunca sokulması çok olası görülmektedir. Bu suyun kaynağının yitik tortullar içerisinde olması olsanızdır. Mekanik güçlüklerden ayrı olarak, yerkimyasal zorlamlar da özel durumlarda dağılışum magma dizileriyle sağlanan tortul tutarını büyük ölçüde kısıtlamaktadır. Bu nedenle Tonga-Kermadek 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 çoğulukla bazalt-dolerit, gabro ile tüm bunların baskalaşım türevlerinin (çoğulukla yeşilşistler ve amfibolitler) heterojen karışımından oluşan olduğuna inanılmaktadır. Mantoya yitim yoluyla yeşilşistler amfibolite dönüşürken serbestleyen fazla su susuz mafik kayaların çögünü amfibolite dönüştürür. Bu olgu suyun



Sekil 8: Amfibolit-eklojite degeşim eğrisiyle birlikte brusit, serpentinit, talk ve $2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot 3\text{Mg}(\text{OH})_2$ 'nin su yitirme etkileşmesi için gereken basinc-sicaklık denge eğrileri. Tüm eğriler için basinc koşulları $P_{H_2O} = P_{\text{Toplam}}$.

manto içersine taşınmasındaki ana "taşıyıcılar"dan birisidir. Cann (1970) serpentinitin olasılıkla, küçük ancak önemli bir okyanus kabuğu bileşeni olduğunu ve kırık kuşakları boyunca yükselen yapıpirlere sokulduğunu belirtmiştir. Serpentinit yalnızca yüzde onu oluştursa bile, kabuktaki toplam suyun büyük bölümünü amfibolitten çok serpentinit taşıyabilecektir.

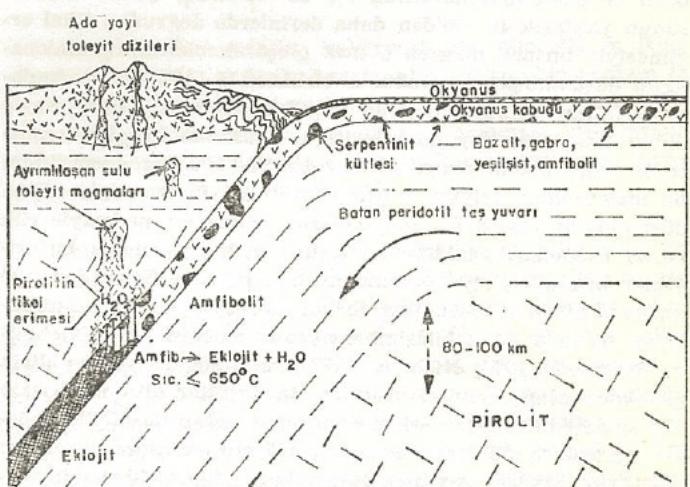
Serpentinitin davranışları su yitirme sırasında amfibolitten kesinlikle değişiklidir (Şekil 8). 900°C altındaki sıcaklıklarda amfibolitin eklojite + H_2O 'ya dönüşümü yaklaşık olarak 25-30 kb'da izobarik olmasına karşın, serpentinit hemen hemen eşsiz olarak 40 kb üzerinde bir dizi su yitirme etkileşmesine uğramaktadır. Yeni bir yoğun sulu magnezyum silikat dizişi ortaya çıkarılmıştır (Ringwood ve Major, 1967; Sclar ve diğ., 1967). Bunların bazıları çok yüksek basınç ve sıcaklıklarda duruyor (örneğin: 100 kb, 1200°C). $2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot 3\text{Mg}(\text{OH})_2$ evresi dışında (Yamamoto ve Akimoto, 1973; Şekil 8), bu sulu magnezyum silikatların duraylılığı ilişkileri şimdilik ortaya çıkarılamamıştır. Bununla birlikte 40 kb üzerindeki basınçlarda serpentinitin $2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot 3\text{Mg}(\text{OH})_2$ + enstatit + H_2O 'ya dönüseceği ve diğer evreleri kapsayan bir dizi su yitirme etkileşmesinin de çok geniş bir basınç, sıcaklık aralığında oluşacağı kesindir.

Yukarıda görüldüğü gibi, amfibolit 100 km'den daha derinlerde su taşıyamaz. Bu derinlikten daha aşağılarda 100-300 km arasında serpentinit ile, serpentinitin yüksek basınç türrevleri olasılıkla kesin bir rol oynar. Serpentinit yapıpirlерinin varlığı okyanus kabuğu boyunca 100-300 km aralığındaki yüksek P_{H_2O} 'yi koruyacaktır. Bundan başka, çeşitli su yitirme etkileşmeleri yardımıyla bu serpentinit yapıpirlerinden türeyen su 100-300 km aralığı boyunca sürekli olarak Benioff kuşağı üzerindeki kama içersine sokulabilmektedir. Bu olgu, bu bölgede Barazangi ve Isacks (1971) tarafından gözlenen deprem hızı azalmasından sorumlu olabilir.

TASOLUSUM SENTEZLERİ

Yazar, volkanların Benioff kuşağına göre yeri bakımından volkanik evrimin iki evresinin (erken toleyitik-sığ-evre ve sonraki kalkalkali-derin-evre) ve bu evrelerin yerkimyasal övgül niteliklerinin açıklanmasına özellikle ilgi göstermektedir. Aşağıdaki en iyi biçimde getirilmiş model Nicholls ve Ringwood (1972, 1973)'un önerilerine dayanmaktadır. Gerçek durum kuşkusuz bu modelde gösterildiğinden daha karmaşık olmalıdır.

İlk evre Şekil 9'da verilmiştir. Yitik taşıyvar alçaları, Benioff kuşağı boyunca oluşan isımanın nedeni yoğunluk dağılımıdır. İsisal modeller (Oxburgh ve Turcotte, 1970) okyanus kabuğunun bityük bölmündeki sıcaklıkların, kabuğun 100 km'lik derinlige ulaşlığı aşamasında $650 - 700^\circ\text{C}$ 'ı aşmasının olaksız olduğunu göstermektedir. Bu nedenle amfibolitin eklojite + H_2O 'ya dönüşümü 80-100 km derinliklerde ergime noktası altındaki koşullarda olur ($P_{H_2O} = \text{Pyük basinci} \times \text{kuvars eklojite katı evresi hakkındaki bilgiler için b.kz. (Hill ve Boettcher, 1970)}$). Kalın parçadaki amfibolitin su yitirmesiyile oluşan suyun büyük bölümünü viskozitede belirgin bir azalmaya neden olarak ve pirolitin Benioff kuşağından yükseltmesini başlatarak yukarıdaki manto içersine yükselir. Tikel ergime yükselen yapıpirlerde yüksek su buharı basıncında sulu toleyit magmalarının ayrılmasına öncülük ederek olur. Daha önceki tartışmayı (amfibolitçe denetlenen bölgemlenme)



Sekil 9: Yitik okyanus kabuğundaki amfibolitin su yitirmesini, suyun üstteki kütleye içersine sokulmasını, ada yayı toleyit magmatik dizilerinin oluşumunu kapsayan bir ada yayının gelişiminin ilk aşaması.

izleyerek, bu magmaların amfibol ve piroksenle birlikte bulunan olivinin ayrılmasıyla bölümlendigine inanılmaktadır. Bu bölümlenme sırasında ada yayı gelişiminin erken toleyitik aşaması oluşur. Bu aşamanın başlıca özgül niteliği silikat bileşenlerinin (buhar aşamasında taşınan), yitik okyanus kabuğundan toleyit magmaları (üstteki kama içinde son olarak gelişen) içersine tasınmasıdır.

Daha derinlerde okyanus kabuğunun büyük bölümü kuvars eklojite dönüştürmektedir. Bununla birlikte serpentinit ve yüksek basınç türevlerinin su yitirmesi 100 - 300 km aralığındaki kabuk boyunca yüksek P_{H_2O} 'ı korur. Kabuktaki sıcaklık yaklaşık $750^{\circ}C$ 'a yükselirken, kuvars eklojitin tikel ergimesi oluşur. Bu oluşum sırasında özellikle 100 - 150 km derinlik aralığında riyodasit-riyolit magmalarının gelişmesine neden olur. Bu magmalar yüksek K/Na oranları, yüksek uyuşmaz element bollukları, nadir toprakların güdü bölgemlenme düzenleriyle betimlenmektedir. Bu eriyiklerin yüzeye doğrudan doğruya ulaşmaları çok seyrek durumlarda olanaklıdır. Bunun yerine, üstteki pirolit manto ile etkimeye girmesi, onu granatlı piroksenite dönüştürüp okyanus kabuğundan ayrılan iz elementlerin gökelmesine yol açacak olan bu elementlerin piroksenitte zenginleşmesine neden olması, ayrıca kalkalkali bolluk düzenlerini geliştirmesi daha olañaklıdır. Piroksenit küteleri çevrelerini saran pirolitten çok daha az bir yoğunluk göstermektedirler. Bunun yanısıra suyun sokulması nedeniyle bunların yüksek derecede akişkan olmaları olanaklıdır. Sonuç olarak, ıslak piroksenit yapıpları Benioff kuşağından ayrılmakta ve yükselslerlerken tikel ergimeye uğramaktadırlar. Ayrılan magmalar yüksek K/Na oranları, yüksek uyuşmaz element bollukları, bölgemlenmiş nadir toprak düzenleriyle betimlenmektedirler. Bu magmalar yükselslerlerken, derinlerde eklojıt kristallenmesiyle, orta derinliklerde amribollerin kristallenmesiyle, sıç derinliklerde piroksen \pm plajyoklas kristal-

lenmesiyle bölgemlenmektedir. Tüm bu bölgemlenme denetimleri arasında sürekli geçişler olanaklıdır. Bu yöntemle, kalkalkali özgül niteliklere sahip bir dağılum türü magmalar dizisi oluşmaktadır (Şekil 10).

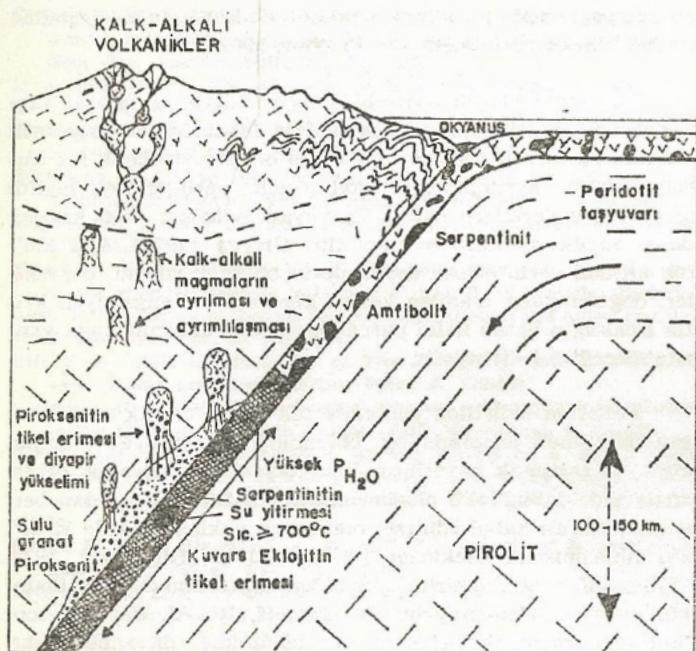
Bu modele göre kalkalkali magmaların son olarak iki ayrı kaynaktan türediği görülmektedir. (yitik okyanus kabuğunun tikel ergimesiyle ve Benioff kuşağı üstündeki pirolit kamاسının tikel ergimesiyle). Yitik okyanus kabuğunun tikel ergimesiyle kalkalkali magmaların türemesi belki de yüzlerce kilometre uzaktaki bir okyanus ortası sırtından taşınan ve bu nedenle mantonun yatay ayırmılmasına sürecini betimleyen bir bileşen gerektirmektedir. Pirolit kamاسının tikel ergimesi yoluyla kalkalkali magmaların oluşumu ise pirolit mantosunun kesinlikle düşey ve yerel bir ayırmılmasını tanımlamaktadır.

Yaklaşık 150 km aşağıda eski mafik okyanus kabuğu Şekil 6'nın ısisal bölümünü kaplayan, aşırı derecede erimez iki minerali eklojite dönüştürmeye bağlamakta ve düşük ergime bileşenleri ve uyuşmaz elementler bakımından büyük ölçüde soğurulmaktadır. Aynı biçimde, ilksel olarak okyanus sırtı yakınında oluşmuş ve bazaltik okyanus kabuğunun bütünlilikçi olan, alttaki peridotit de nitelik bakımından kalıntı ve erimezdir. Bunun yanısıra düşük ergime noktası bileşenleri ile uyuşmaz elementler bakımından büyük ölçüde soğurulmuştur. Bu nedenle, mantoya batan taşıvuar aşırı derecede ergime iki bileşene (eklojıt ile peridotit) ayırmılasmaya başlamaktadır. Bu bileşenlerin her ikisi de pirolitten daha yüksek derecede başlangıç ergime sıcaklıklarına (kati evre sonrası) sahiptir. Bu ısisal özgül nitelikleri bu bileşenlerin her birinin büyük boyutlarıyla birleşmektedir. Uyuşmaz elementler bakımından soğurulmaları, ise, batan taşıvuarın daha sonraki herhangi bir ergime döneminde bir bazalt magması kaynağı olarak kullanılması olañğını tümüyle ortadan kaldırmaktadır. Bu ergime dönemi 5 - 50 km'lik boyutlarda ergime eklojıt ve peridotit bloklarının, homojen bir pirolit bileşimi düzenlemek için, derin manto içersinde kita aşamasında sm'den m'ye ölçeklerde sıkı bir biçimde yeniden karışabilecekleri belirsiz bir yol olarak görünür. Bundan başka, bu olgu taşıvardan ayrılan ve kita kabuğuna eklenen düşük ergime bileşenleri ve uyuşmaz elementlerin yeniden sokulmasını gerektirmektedir. Görünürde bu sonuca ulaşan olası bir model yoktur.

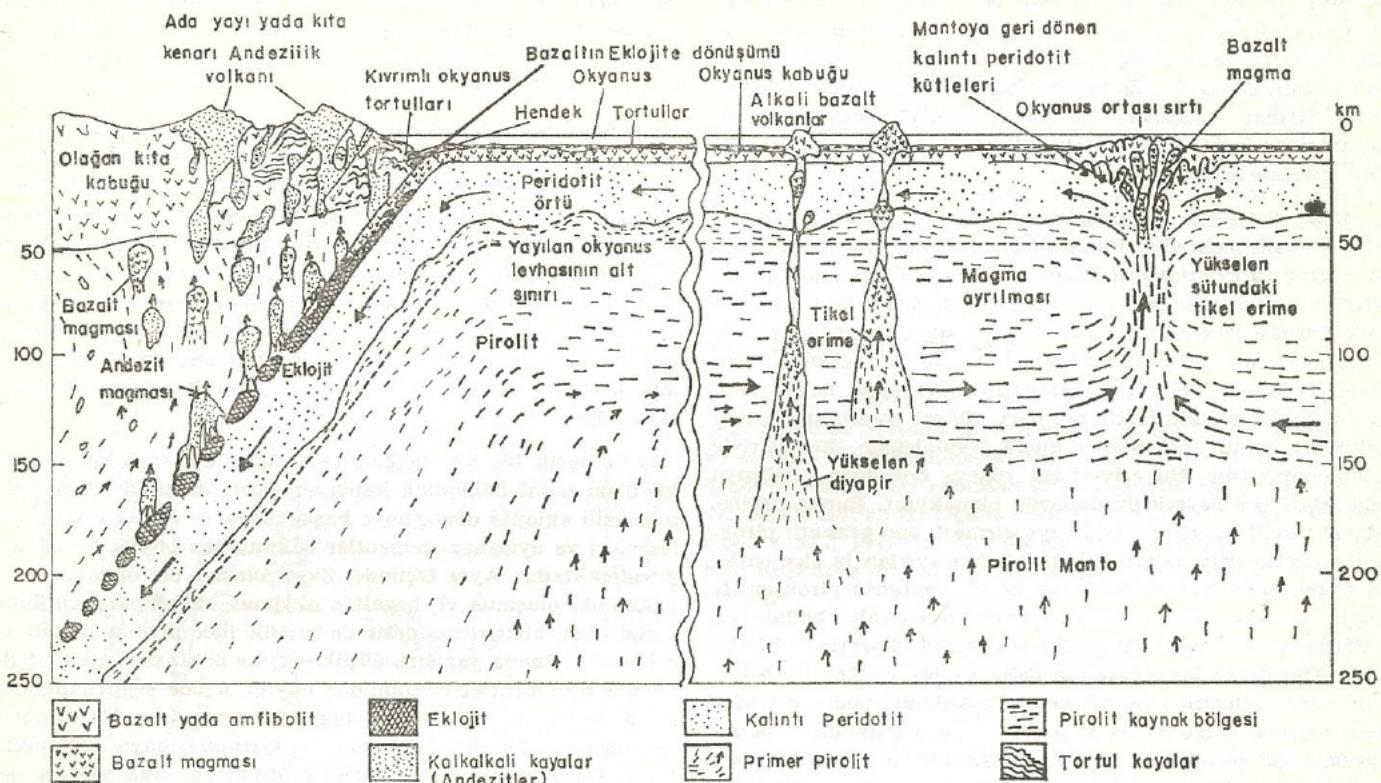
Buradan, taşıvuarın, Ringwood (1969)'un da belirttiği gibi tek yönlü olarak ayırmılasmaya başladığı sonucu çıkar. Bu tek yönlü ayırmılasmannın bütünlilikçi ürünlerini dağılum türü magmatizmayla son olarak türeyen kita kabuğu kayaları ve soğurulmuş, ergime batan kalın eklojıt ve peridotit parçasıdır.

MANTONUN AYRIMLILAŞMASI

Mantonun ayırmalma sürecinin okyanus ortası sırlarının altındaki yerçekimsel olarak duyarsız düşük hız kuşağında başladığı kabul edilmektedir. Pirolit yapıpları bu bölgeden yukarıya doğru yükselsir ve tikel ergimeye uğrayarak bazalt magmasının oluşumuna ve onun yanısıra ergimemis kalıntı peridotitin gelişmesine yol açar. Bu bileşenler son olarak, ergime peridotit taşıvuarı ve üstteki mafik okyanus kabuğunu oluştururlar. Kaynak bölgesinin düşük hız kuşağı olduğu ve gelişiminin ilk başlangıçta, okyanus sırları altındaki ve mantonun daha derinliklerindeki kaynak bölgelerinden



Şekil 10: Diyalitik yükselme ve kalkalkali tür magmaların oluşumuna neden olan, Benioff kuşakları üstündeki magma ile eriyiklerin etkileşmesini ve okyanus kabuğının tikel ergimesini kapsayan ada yayı gelişiminin son aşaması.



Sekil 11: Tek yönlü manto ayırmılığası ve kıtasal evrim modeli. (AGU'nun izniyle Ringwood, 1969'dan).

yukarya doğru düsey devinimlerden çok, düşük hız kuşağından içeriye doğru yatay akmalarla (Ringwood ve D. Green, 1966; Ringwood, 1969) desteklentiği düşünülmektedir. Önerilen akma biçimini şekil 11'de gösterilmiştir. Bu sıçrın konvektif kuşaklarda akma biçiminin yayarı, okyanus ortası sırtlarının yatay akışkanlığının daha kolay açıklanabilmesidir.

Mafik kabuk ve alttaki peridotit taşıyvar levhası bundan sonra sırttan dışa doğru yer değiştirir. Bu devinim daha önce de tartışıldığı gibi, başlangıçta ergimsiz düşük hız kuşağında kayarak bir hendeğe ulaşma ve manto içersine batma biçiminde olur. Burada, okyanus kabuğu ve mantonun tikel ergimesini gerektiren ikinci bir ayırmılılaşma aşaması oluşur. Bu ayırmılılaşma, yukarıya yükselen gittikçe daha silisce zengin dağolusum türleri magmaların oluşumuna neden olur ve yeni bir kita kabuğunu gelişimine katkıda bulunur. Bunlar, ya varolan bir kita kenarına yanal eklenme biçiminde ya da daha sonradan bir kita kenarına eklenen okyanus içi bir ada yayı dizgesi biçiminde olusabilir. Son olarak, gelişen kita kabuğu altındaki bölge düşük ergime noktası bilesenleri bakımından sağlanmaya başlar ve ergimesiz peridotitin kimyasal durumunu kazanır.

Değişik veriler tüm kita kabuğının büyük bir bölümünün yukarıda ileri sürülen tek yönlü manto ayırmılışma süreciyle olduğunu gösterir. Bu nedenle, izotopik ve jeokronolojik veriler kabuğun jeolojik zaman süresince dereceli olarak mantodan gelişliğini göstermektedir (Hurley ve diğ., 1962; Engel, 1963). Dağolusum volkanizmasının bugünkü oranları geçmiş dönemlerin oranlarına benzemekteyse, yaklaşık 3000

m.y. önceki kita kabuğunu oluşumu için bu oranlar yeterlidir (Wilson, 1954). Kita kabuğunu ortalama kimyasal bileşimi de ada yayalarında püsküren ortalama andezitlerin bileşimine benzer olarak görülmektedir (Taylor, 1967).

Tek yönlü olarak ayırmılışmış peridotit ve eklogit taşıyvar levhası okyanus ortası sırtları üzerindeki magmatik etkinlik için başka bir kaynak bölge oluşturan düşük hız kuşağı içersine ayırmılışmış ilkel piroliti yerleştirerek manto içine doğru derinlere batar. Taşıyvar levhaları 700 km'den daha büyük derinliklere batabilir. Griggs (1972), 700 km'in altında derin odaklı depremlerin bulunmayısının, depremleri doğrudurga inanılan kesme gerilimlerini engelleyen kritik sıcaklığın batan kalın parça tarafından kazanılmasını yansıtabileceğini belirtmiştir.

Yukarıda belirtilen yöntemle tek yönlü olarak ayırmılışan mantonun hacminin bir bölümünükestirmeye (tahmin etmeye) çalışmak yararlıdır. Yeni taşıyvarın okyanus ortası sırtlarındaki bugünkü oluşum oranı son 3.5×10^9 yıldan beri geçerli olarak kabul edilirse, mantonun yaklaşık yüzde 30-60'ı ayırmılışmıştır (Dickinson ve Luth, 1971; Ringwood, 1972, 1973). Diğer bir kestirim, şimdi kabukta bulunduğuuna inanılan uyugmaz elementlerin (örneğin; K, Rb, U, Ba, La) toplam yeryuvarındaki değerinin bir bölümune dayanmaktadır. Kita kabuğının yukarıda tartışıldığı gibi geliştiğini düşünerken yapılan çeşitli kestirimler mantonun yüzde 30-50'sinin ayırmılışlığı sonucuna götürür (Birch, 1958; Gast, 1960; Taylor, 1967; Ringwood, 1972, 1973).

Dickinson ve Luth (1971) 700 km'nin altındaki tüm derin mantonun (ortayuvar) tek yönlü olarak ayrımlılaşmış taşıyuvardan oluguk olduğunu ve bugünkü taşıyuvar levhalarının ancak 700 km'ye dek battığı ve ortayuvarın dışına ekiendiğini ortaya atmışlardır. Bu varsayılmış taşıyuvar oluşum hızının geçmişte daha yüksek olmasını gerektirir. Bu yazarlar taşıyuvar oluşum hızının mantodaki U, Th, K tarafından geliştirilen radyojenik ısı oluşumunun hızı ile orantılı olabileceğini ileri sürmektedirler. En uygun model ne olursa olsun, mantonun büyücük hatta büyük bir bölümünün jeolojik zaman süresince tek yönlü olarak ayrımlılaşlığı ve kita kabuğunun bu sürecin başlıca ürünü olduğu sonucundan kaçınılmaz güçtür.

KATKI BELİRTME

Bu yazında gözden geçirilen deneyel çalışmaların çoğu ve görüşlerinin bazısı Dr T. H. Freen (Macquarie Üniversitesi) ve Dr I. A. Nicholls (Avustralya Ulusal Üniversitesi) ile birlikte gerçekleştirilen incelemelerin sonuçlarıdır. Yazar bu meslektaglarının büyük katkıları olduğunu belirtmek ister. Yazı, yazara, Cambridge Üniversitesi Churchill Koleji'nde bir Denizasısı Öğretim Üyeliği olanağı sağladığı bir süre içerisinde yazılmıştır. Yazar destekleri, olağanüstü ve konukseverlikleri için Cambridge'deki Churchill Koleji'ne, Mineraloji ve Petroloji Şubesi'ne, Jeodezi ve Jeofizik Şubesi'ne teşekkürlerini belirtir. Yazar karalamalarını eleştirel bir biçimde okuyan, Mineraloji ve Petroloji Şubesi'nden Dr I. D. Muir'e de teşekkürlerini sunar.

DEĞİNİLEN BELGELEER

- Baker, P. E., 1968, Comparative volcanology and petrology of the Atlantic island arcs: *Bull. Volcan.*, 32, 189-206.
- Barazangi, M. ve Isacks, B., 1971, Lateral variations of seismic-wave attenuation in the upper mantle above the inclined earthquake zone of the Tonga island arc: Deep anomaly in the upper mantle: *J. Geophys.*, 76, 8493-8516.
- Birch, F., 1958, Differentiation of the mantle: *Geol. Soc. America Bull.*, 69, 483-486.
- Brown, G. M. ve Schairer, J. F., 1968, Melting relations of some calc-alkaline volcanic rocks: *Carnegie Inst. Washington Yearbook*, 66, 460-467.
- Cann, J. R., 1970, A new model for the structure of the oceanic crust: *Nature Lond.*, 222, 925-930.
- Carmichael, I.S.E., 1964, The petrology of Thingmuli, a Tertiary volcano in eastern Iceland: *J. Petrology*, 5, 435-460.
- Daly, R. A., 1933, Igneous rocks and the depths of the Earth: McGraw-Hill, New York.
- Dickinson, W. R., 1962, Petrogenetic significance of geosynclinal andesitic volcanism along the Pacific margin of North America: *Geol. Soc. America Bull.*, 73, 1241-1256.
- Dickinson, W. R., 1968, Circum-Pacific andesite types: *J. Geophys. Res.*, 73, 2261-2269.
- Dickinson, W. R. ve Hatherton, T., 1967, Andesitic volcanism and seismicity around the Pacific: *Science*, 157, 801-803.
- Dickinson, W. R. ve Luth, W. C., 1971, A model for plate tectonic evolution of mantle layers: *Science*, 174, 400-404.
- Engel, A.E.J., 1963, Geologic evolution of North America: *Science*, 140, 143-152.
- Ewart, A., Bryan, W. B. ve Gill, J., 1973, Mineralogy and geochemistry of the younger volcanic islands of Tonga, S. W. Pacific: Baskıda.
- Gast, P. W., 1960, Limitations on the composition of the upper mantle: *J. Geophys. Res.*, 65, 1287-1297.
- Gill, J. B., 1970, Geochemistry of Vitu Leon, Fiji and its evolution as an island arc: *Contr. Miner. Petr.*, 27, 179-203.
- Gorshkov, G. S., 1962, Petrochemical features of volcanism in relation to the types of the earth's crust: *AGU Monograph*, 6, 110-115.
- Green, D.H., 1973, Experimental melting studies on a model upper mantle composition at high pressures under water-saturated and water-undersaturated conditions: *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19, 37-53.
- Green, D. H. ve Ringwood, A. E., 1967, The genesis of basaltic magmas: *Contr. Miner. Petr.*, 15, 103-190.
- Green, T. H., 1972, Crystallization of calc-alkaline andesite under controlled high pressure hydrous conditions: *Contr. Miner. Petr.*, 34, 150-166.
- Green, T. H. ve Ringwood, A. E., 1968, Genesis of the calc-alkaline igneous rock suite: *Contr. Miner. Petr.*, 18, 105-162.
- Green, T. H. ve Ringwood, A. E., 1972, Crystallization of garnet-bearing rhyodacite under high pressure hydrous conditions: *J. Geol. Soc. Australia*, 19, 203-212.
- Griggs, D. T., 1972, The sinking lithosphere and the focal mechanism of deep earthquakes: Robertson, E. C., ed., *The nature of the solid Earth* de: McGraw-Hill, New York, 361-384.
- Hill, R. E. T. ve Boettcher, A. L., 1970, Water in the earth's mantle: melting curves of basalt-water and basalt-were-carbon dioxide: *Science*, 167, 980-982.
- Holloway, J. R. ve Burnham, C. W., 1972, Melting relations of basalt with equilibrium water pressure less than total pressure: *J. Petrology*, 13, 1-29.
- Hurley, P. M., Hughes, H., Faure, G., Fairbairn, H. ve Pinson, W., 1962, Radiogenic strontium-87 model of continent formation: *J. Geophys. Res.*, 67, 5313-5336.
- Jakés, P. ve Gill, J., 1970, Rare earth elements and the island arc tholeiite series: *Earth Planet. Sci. Lett.*, 9, 17-28.
- Jakés, P. ve White, A. J., 1969, Structure of the Melanesian Arcs and correlation with distribution of magma types: *Tectonophysics*, 8, 223-236.
- Kuno, H., 1950, Petrology of Hakone volcano and the adjacent areas, Japan: *Geol. Soc. America Bull.*, 61, 957-1014.
- Kushiro, I., 1972, Effect of water on the composition of magmas formed at high pressures: *J. Petrology*, 13, 311-334.
- Kushiro, I., Shimazu, N., Makamura, Y. ve Akimoto, S., 1972, Compositions of coexisting liquid and solid phases formed upon melting of natural garnet and spinel lherzolites at high pressures: A preliminary report: *Earth Planet. Sci. Lett.*, 14, 19-25.
- Kushiro, I. ve Yoder, H. S., 1969, Melting of forsterite and enstatite at high pressures under hydrous conditions: *Carnegie Inst. Washington Yearbook*, 67, 153-158.
- Lambert, I. B. ve Wyllie, P. J., 1968, Stability of hornblende and a model for the low velocity zone: *Nature Lond.*, 219, 1240-1241.
- Nicholls, I. A., 1973, Manuscript.
- Nicholls, I. A. ve Ringwood, A. E., 1972, Production of silica-saturated magmas in island arcs: *Earth Planet. Sci. Lett.*, 17, 243-246.
- Nicholls, I. A. ve Ringwood, A. E., 1973, Effect of water on olivine stability in tholeiites and the production of silica-saturated magmas in the island-arc environment: *J. Geology*, 81, 285-300.
- O'Hara, M. J., 1963, Melting of garnet peridotite and eclogite at 30 kilobars: *Carnegie Inst. Washington Yearbook*, 62, 71-77.
- Oversby, V. M. ve Ewart, A., 1972, Lead isotopic compositions of Tonga-Kermadec volcanics and their petrogenetic significance: *Contr. Miner. Petr.*, 37, 181-210.
- Oxburgh, E. R. ve Turcotte, D. L., 1970, The thermal structure of island arcs: *Geol. Soc. America Bull.*, 81, 1665-1688.
- Ringwood, A. E., 1969, Composition and evolution of the upper mantle: *AGU Monograph*, 13, 1-17.
- Ringwood, A. E., 1972, Phase transformations and mantle dynamics: *Earth Planet. Sci. Lett.*, 14, 233-241.

- Ringwood, A. E., 1973, Composition and petrology of the Earth's mantle: McGraw-Hill, New York, Baskida.
- 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 Mg_2SiO_4 -MgO-H₂O: Earth Planet. Sci. Lett., 2, 130-133.
- Sclar, C. B., Garrison, L. C. ve Stewart, O. M., 1967, High pressure synthesis of a new hydroxylated pyroxene in the system MgO-SiO₂-H₂O (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 calc-alkaline 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, Kangertlugssaq, 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-SiO₂-H₂O: Baskida.
- 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.