

Hisarlıdağ (Enez-Trakya) Volkanizması Ortaç ve Asidik Kayaçlarının Jeokimyasal ve Petrolojik Özellikleri

Geochemical and Petrologic Properties of Intermediate and Acidic Rocks of Hisarlıdağ (Enez-Trakya) Volcanism

AYKUT GÜÇTEKİN^{1*}

¹Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 41380 Kocaeli

Geliş (received) : 09 Ocak (January) 2017

Kabul (accepted) : 05 Mayıs (May) 2017

ÖZ

Trakya güneyinde Enez civarlarında bulunan Hisarlıdağ şoşonitik volkanizması ortaç ve asidik bileşimde lavlar ve geniş hacimlerde piroklastik ürünlerinden oluşmaktadır. Kayaçlar %52-67 arasında değişen silis içerikleriyle bazaltik andezitten dasite kadar bileşim aralığı sunmaktadır. Volkanizmayı oluşturan kayaçlar genel olarak hyalopilitik, porfirik dokular sergilemekle birlikte fenokristal topluluklarında gözlenen bir dizi dengesiz kristallenme özellikleri ile belirgindir. Kayaçların nadir toprak element (REE) içerikleri normalize diyagramında düzenli ve yarı paralel olup, hafif nadir toprak elementlerde (LREE) ağır nadir toprak elementlere (HREE) göre göreceli bir zenginleşme görülmektedir. N-tipi MORB'a göre normalize edilmiş çoklu element diyagramında Rb, Ba, Th, U, K gibi iri katyonlu litofil (LIL) elementlerde ve hafif nadir toprak elementlerde belirgin zenginleşme, Ta, Nb, Ti, Hf gibi yüksek değerlikli katyonlar (HFS) ve ağır nadir toprak elementlerde (HREE) göreceli tüketilme yitim bileşeni etkisi ile manto kaynağında metasomatizmayla açıklanabilir.

İz element verileri ile teorik olarak hesaplanan fraksiyasyon vektörleri, kayaçların gelişiminde plajiyoklaz, ortopiroksen, K-feldispat, amfibol, klinopiroksen kristalizasyonunun etkili olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde asimilasyon ve fraksiyonel kristalizasyon (AFC) süreçlerini belirlemek için yapılan modellemelerden elde edilen sonuçlar, metasomatize olmuş bir manto kaynağından türeyen magmanın AFC işlemlerinden etkilendiğini ($r=0.2-0.8$) ve değişen oranda kabuksal malzeme ile kirlendiğini göstermektedir. Şoşonitik karakterli K'ca zengin ortaç kayaçlardan oluşan Hisarlıdağ volkanizması, yaklaşan plaka sınırlarına benzer jeokimyasal özellikler göstermekle birlikte, flogopit içeren kıta altı litosferik mantonun ergimesi sonucunda gelişmiştir.

Anahtar Kelimeler: Magma karışımı, manto metasomatizması, şoşonitik seriler, Trakya.

ABSTRACT

Hisarlıdağ shoshonitic volcanism in the vicinity of Enez located in the southern Thrace region is composed of intermediate and acidic lavas and voluminous pyroclastic materials. The composition of extrusive igneous rocks ranges from basaltic andesite to dacite with silica content between 52 and 67 wt. %. The rocks that are products of volcanism generally exhibit hyalopilitic and porphyritic texture and a series of disequilibrium crystallization properties observed in phenocrystal groups are distinctive. The rare earth element patterns of the rocks on normalized plots are straight and subparallel, and relative enrichment is seen in the light rare earth elements (LREE) in comparison with the heavy rare earth elements (HREE). In the multi-element diagram normalized to N-MORB, a significant enrichment in large ion lithophile elements (LIL) such as Rb, Ba, Th, U, K and light rare earth elements (LREE) and a relative depletion in high field strength elements (HFS) such as Ta, Nb, Ti, Hf and heavy rare earth elements (HREE) can be explained by metasomatism in the mantle source with the effect of subduction component. Fractionation vectors calculated theoretically with trace element data indicate that plagioclase, orthopyroxene, K-feldspar, amphibole, clinopyroxene minerals are the main minerals in crystallization assemblages of the rocks. Similarly, the results from the assimilation and fractional crystallization (AFC) modelling show that the magma derived from metasomatized magma source was affected by AFC processes ($r=0.2-0.8$) and contaminated by crustal material in variable degrees. Hisarlıdağ volcanism composed of shoshonitic intermediate extrusive rocks enriched in K exhibits similar geochemical properties to convergent plate margins, it also indicates the partial melting of phlogopite bearing subcontinental lithospheric mantle.

Keywords: Magma mixing, mantle metasomatism, shoshonitic series, Thrace.

* A. Güçtekin

e-posta: a_guctekin@yahoo.com

GİRİŞ

Trakya bölgesinde farklı dönemlerde gelişen jeodinamik olaylar sonucu oluşan volkanik kayalar bulunmaktadır. Bölgede öncelikle, çarpışma kökenli Üst Eosen-Üst Oligosen yaşlı kalk-alkalen ve yüksek K'lı kalk-alkalen volkanik kayalar gözlenmektedir (Ercan, 1992). Bu kayalardan daha genç olan, Üst Miyosen yaşlı volkanik kayalar, kabuk ve manto malzemesinden türeyen şoşonitik volkanizmanın ürünüdür (Sümengen vd., 1987). Bölgede en son evrede ise Geç Miyosen-Kuvaterner zamanlarında gelişmiş, lokal gerilmeli zonlar boyunca görülen silisçe doyumsuz, mafik, küçük çaplı lav serilerinden oluşan geç evre alkali volkanizma gözlenmektedir (Aldanmaz vd., 2006).

Yay benzeri iz element içerikli yüksek K ve kalk-alkalen kayaların kökeni küresel bir sorundur (ör., Rock, 1984; Sloman, 1989; Turner vd., 1999). Yüksek-K kalk alkali magmatizma ile yitim zonları arasındaki ilişki uzun zamandır tanımlanmaktadır (Peccerillo, 1985; Rogers ve Hawkesworth, 1985). İri kationlu litofil elementler ve hafif nadir toprak elementlerdeki zenginleşme ile yüksek değerlikli kationlardaki göreceli tüketilmenin kombinasyonu yay lavlarına benzerdir (Gill, 1981; Wilson, 1989). Ancak tipik yay benzeri iz element dağılımı ile yüksek K magmalarının faaliyeti aktif yitim sonrası kaydedilir ve yükselme, gerilme veya doğrultu atım hareketi ile senkronize şekilde meydana gelir (Sloman, 1989). Bu kayaların yorumlanması, metasomatizma yoluyla mantoda üretilen kimyasal heterojenliğin yitim sonrası mevcut olabildiğini göstermektedir (Rogers vd., 1987; Thirwall, 1988; Sloman, 1989).

Trakya Enez civarında Hisarlıdağ volkanizması olarak adlandırılan volkanik sahada ortaç ve felsik lavların ürünleri ile birlikte geniş hacimlerde piroklastik ürünler bulunmaktadır. Ortaç ve felsik magmalar yerkürde oldukça bol gözlenmesine rağmen, petrojenetik çalışmalarda çoğunlukla bazik kayaların kullanılmasının nedeni bazik ürünlerin felsik ürünlere göre fraksiyonel kristalizasyon ve kabuk kirlenmesi gibi farklılaşma işlemlerinden daha az etkilenmesidir. Özellikle kristal oranı düşük bazaltik kayalar genellikle kayaç grupları içerisinde en primitif bileşime sahiptir ve bu nedenle magma kaynaklarının en belirleyici bileşimlerini hesaplamada güvenilir bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun tersine felsik kayalar yüksek uyumsuz element içeriklerine ve çoğunlukla yüksek kristal oranına sahip olduğu için geniş bir şekilde fraksiyonel kristalizasyon ve asimilasyon fraksiyonel kristalizasyon süreçlerin-

den etkilenmiş olabilir. Bu nedenle bölgede sadece düşük oranlarda farklılaşmayı işaret eden kristal oranı düşük volkanik kayaların değerlendirilmesi ile petrojenetik tanımlamalar yapılabilir.

Bu çalışmada, Trakya'da görülen Senozoyik yaşlı, orojenik kökenli Hisarlıdağ volkanizmasının ana ve iz element konsantrasyonlarından faydalanarak kayaların jeokimyasal özellikleri ile fraksiyonel kristalizasyon ve asimilasyon gibi farklılaşma süreçleri belirlenecektir. Kayaların iz element oranları ile de kaynak karakteristikleri belirlenmeye çalışılacaktır.

GENEL JEOLojİ

Istranca masifinin güneyinde yer alan Trakya havzası, üçgen şekilli olup Tersiyer yaşlı büyük bir havzadır (Keskin, 1974). Kuzeyinde Karadeniz, doğusunda Marmara ve güneyinde Ege havzaları ile sınırlı olan bu havzanın Eosen Pliyosen yaşlı sedimanter çökeltilerle 9000 m kalınlığa ulaştığı belirtilmektedir (Kopp vd., 1969; Turgut vd., 1983, 1991; Görür ve Okay, 1996; Turgut ve Eseller, 2000).

Trakya havzası "Trakya Paleojen Havzası" ve "Trakya Neojen Havzası" olarak iki bölüme ayrılmaktadır (Elmas, 2003). İstifin en alt bölümünü Trakya Paleojen havzasının Alt Eosen-Alt Orta Miyosen çökelleri oluşturur ve bu çökeller Orta Eosen-Erken Oligosen transgresif, Orta Oligosen-Erken Miyosen'de ise regresif karakterlidir (Keskin, 1974; Turgut vd., 1983; Saner, 1985). En üstte Trakya Neojen havzasının Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı kıtasal silisik kırıntılıları, Trakya Paleojen havzası ve temel birimlerini ve farklı stratigrafik bölümlerini uyumsuz olarak örtmektedir (Elmas ve Şengül, 2013).

Bölgede Tersiyer öncesi temel birimleri kuzeyde Istranca Masifi, güneyde Pontid-Sakarya Zonu ve batıda Rodop-Pontid parçalarından oluşan Rodop Masifi oluşturmaktadır (ör; Ricou vd., 1998; Okay vd., 2001). Istranca Masifi Paleozoyik temel ve Triyas metasedimanter örtüden oluşur ve güneyde Trakya Fay Zonu ile sınırlıdır (ör; Natalin vd., 2012). Sakarya Zonu, Paleozoyik yaşlı granitoidler ile Jura ve daha genç sedimanları uyumsuz olarak üzerleyen Triyas yaşlı yığılım kompleksinden oluşur (Okay vd., 1996). Rodop Masifi, Vardar okyanusunun kapanması ve yitimle bir araya gelen kıtasal ve okyanusal karakterli Alpin ve Alpin öncesi naplardan oluşmaktadır (ör; Bonev ve Stampfli, 2011).

Havza genelinde, Erken-Orta Eosen döneminde, karasal ve denizel çökeltilerde yanal ve düşey yönde ge-

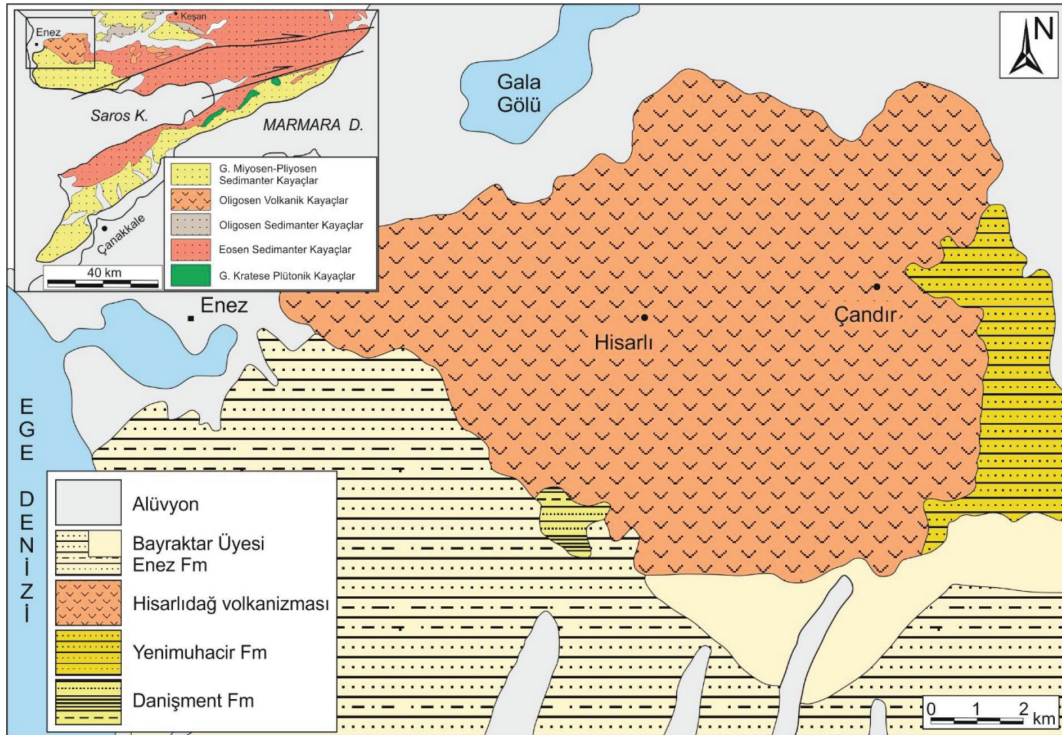
çişler bulunmaktadır (Siyako, 2005; 2006). Orta-Geç Eosen'de türbiditlerden oluşan Keşan formasyonu (Elmas, 2012), Geç Eosen sonu-Erken Oligosen başlarında ise, ortamın sığlaşmasıyla Yenimuhacir Grubu olarak adlandırılan istif çökelmeye başlamıştır (Kasar, vd., 1983; Saner, 1985; Sümengen ve Terlemez, 1991; Atalık, 1992; Siyako, 2005; 2006). Erken Miyosen dönemine kadar benzer ortamda Mezardere, Osmançık ve Danişmen formasyonları çökelmiştir (Ünal, 1967; Kasar vd., 1983; Siyako, 2005; 2006). Bu evrenin sonunda havzanın, dolması ve yükselmesini takip eden aşınma sonrası Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı birimler çökelmiştir. Güneybatı Trakya'da mostralari gözlenen Hisarlıdağ volkanizması Orta-Üst Miyosen çökelleri tarafından üzerlenmektedir (Şekil 1). Bölgede Enez formasyonu olarak adlandırılan (Elmas, 2012), Üst Miyosen birimleri Çanakkale ve Çekmece grupları ile Ergene Formasyonu olarak isimlendirilmektedir (Siyako, 2006).

Bölgede volkanizma ilk kez Orta Eosen sonlarına doğru Gelibolu çevresinde çökel kayaçlarla ara katkılı andezitik, dasitik tüfler ve yer yer küçük alanlarda lavlar şeklinde (Kopp, 1964) gözlenmiştir. Keşan yöresinde volkanizma andezitik, dasitik ve trakitik kayaçlardan oluşmaktadır (Ternek, 1949; Kopp, vd.,

1969). Enez civarında ise Saner (1985) tarafından Hisarlıdağ volkaniti olarak adlandırılan volkanizma, andezitik ve dasitik kayaçlar ile tuf aralanmalarından oluşmaktadır. Yaklaşık olarak 800 m. kalınlığa sahip volkanizma; riyodasitik tüfler, andezit, altere andezitik tüfler ve kırmızımsı yeşil renkli lahar akması ile oluşmuş tüflerle başlar, üste doğru beyaz renkli riyolitik tuf, riyodasit, andezit, bazalt ve bazaltik aglomeralar, ignimbritler ve ortaç aglomeralar ile devam eder (Ercan, 1992). Bölgede geniş bir zaman aralığında gelişen volkanizmanın üst seviyelerini temsil eden andezitik kayaçlardan K/Ar yöntemi ile yapılan yaş tayini sonucu $35,0 \pm 0,9$ milyon yıllık bir yaş saptanmıştır (Sümengen vd., 1987).

PETROGRAFI

Andezitik kayaçlarda hylopilitik, zayıf trakitik ve intersal dokular gözlemlenmiştir. Bazı kayaçlarda vesiküler doku gözlenmekle birlikte, bunların bazılarının kalsit, bazılarının çeperlerinde ise iğnemi klorit mineralleri ile dolduğu görülmektedir. Bu kayaçlar plajiyoklaz, amfibol, klino ve orto piroksen fenokristalleri içermektedir. Plajiyoklazlarda zonlanma ve polisentetik ikizlenme görülürmekte, fenokristallerin yaklaşık %40-60'ını oluşturmakta ve anortit içerikleri



Şekil 1. Hisarlıdağ volkanizmasının jeoloji haritası (Şentürk vd., 1998'den değiştirilerek alınmıştır).
Figure 1. Geological map of the Hisarlıdağ volcanism (modified from Şentürk et al., 1998).

ise %17-23 arasında değişmektedir. Yaygın amfibol kapanımları görülen plajiyoklazlarla birlikte, bu tip kayalarda mantolanmış ve sünger dokulu plajiyoklazlar da bulunmaktadır. Amfiboller yaklaşık %20 oranında, yarı özşekilli ve özşekilsiz olmakla beraber bazılarında korona dokuları mevcuttur. Piroksenler daha az oranlarda olmakla birlikte zayıf glomeraporfirik dokular gözlenmektedir. Bazı örneklerde düşük oranlarda hamur tarafından kemirilmiş kuvarlar, ayrıca hamurda ve mikrofenokristaller halinde opak mineraller görülmektedir.

Dasidik kayalarda ise mikrogranüler ve intersal dokular yaygın olmakla birlikte, fenokristal oranları oldukça düşük, birkaç örnekte aynı kökenli inklüzyonlar görülmektedir. Bu kayalarda plajiyoklaz yaygın fenokristal fazlarını oluştururken bollukları %50-70 arasında ve anortit içerikleri %18-28 arasında değişmektedir. Plajiyoklazlarda elek dokuları, mantolanma ve amfibol kapanımları belirgin gözlenen özel dokular olmakla birlikte, aynı örneklerde bazı plajiyoklazlar ise kapanımsız ve mantolanmamış şekilde bulunmaktadır. Amfiboller özşekilli ve yarı özşekilli olup fenokristallerin yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır ve bazılarında korona dokularına rastlanılmaktadır. Biotitler %5 civarında bazılarında zayıf kloritleşmeler bulunmaktadır. Bazı örneklerde vesiküler bol ve dolgunsuzdur. Örneklerin bazılarında volkanik camın devitrifikasyonu ile oluşan sferulitler görülmektedir.

JEOKİMYA

Analitik Yöntemler

Hisarlıdağ volkanizmasının jeokimyasal karakteristiklerini belirlemek için petrografik çalışmalara göre seçilen 20 volkanik kayacın alterasyonlu yüzeyleri temizlendikten sonra kırma ve öğütme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan örneklerin ana ve iz element analizleri Kocaeli Üniversitesi Analitik Jeokimya Laboratuvarında SKAYRAY EDX3600B model XRF ve PERKIN ELMER-DRC-E model ICP-MS cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İz element analizleri için yaklaşık 0.2 g kayaç tozu 1.4 g LiBO₂ ile ergitilmiş, sonrasında 50 ml %5'lik HNO₃'te çözündürülmüş ve sonuçlar ICP-MS cihazı ile okunmuştur. Analizlerde 20 ppb Re, Rh internal standart örneklerle otomatik olarak eklenmiştir. Analizlerde rölatif standart sapma (RSD) değerleri %5'ten küçüktür. Ana oksitler ergitilmiş diskler hazırlandıktan sonra XRF spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Bu işlem için için 0.6 g kayaç tozu 3 g LiBO₂ ile karıştırılıp 1100 °C'de 15 dakika ısıtılmıştır. Analizlerde standart hata %2'den küçüktür.

Ateşte kayıp değerleri ise kayaç tozlarının 2 saatten fazla bir süre 900°C'de ısıtılması ile belirlenmiştir.

Ana-İz Element Jeokimyası

Hisarlıdağ volkanizmasına ait kayaların tüm kaya kimyasal verilerine göre SiO₂ içerikleri % 52-67 arasında olmakla birlikte, K₂O+Na₂O>5%, K₂O/Na₂O>0.7, düşük TiO₂ (genellikle <0.9), yüksek fakat değişken Al₂O₃ (%14-17) içeriklerine sahiptir (Çizelge 1). Volkanik kayalar Le Bas vd. (1986) toplam alkali (Na₂O+K₂O)'ye karşı SiO₂ (TAS) diyagramında bazaltik trakiandezit, trakiandezit, trakidasit, dasit ve andezit olarak görülürken (Şekil 2a), altere ve ayrışmaya maruz kalmış volkanik kayalarda kullanılabilen Th-Co diyagramında (Hastie vd., 2007), bazaltik andezit, andezit, dasit ve riyolit türü volkanik kayalar yüksek-K ve şoşonitik alana düşmektedir (Şekil 2b). Bu kayalara ait semboller tüm şekillerde aynı kullanılmıştır. Peccerillo ve Taylor (1976) tarafından oluşturulan SiO₂-K₂O diyagramında örneklerin büyük çoğunluğunun şoşonitik karakterde oldukları görülmektedir (Şekil 3). Değişim diyagramlarında seçilmiş TiO₂, FeO, CaO, MgO gibi oksitlerde SiO₂ artışına karşı azalma görülmektedir. Benzer şekilde iz elementler arasında ise SiO₂ artışı ile birlikte Rb, Ba gibi elementlerde pozitif yönsemelere karşı Y elementinde zayıf negatif, Sr elementinde ise yatay bir yönseme gözlenmektedir (Şekil 4).

Kondrite göre normalize edilmiş nadir toprak element diyagramında kayaların hafif nadir toprak elementlerinin, düzenli ve yarı paralel olmakla birlikte ağır nadir toprak elementlere göre, (La_N/Lu_N=8.6-12.3, trakiandezit-trakidasit; La_N/Lu_N=5.7-9.3 andezit, dasit) göreceli olarak zenginleştikleri görülmektedir. Ayrıca negatif Eu anomalileri gözlenmektedir (Şekil 5).

N-tipi MORB'a göre normalize edilmiş çoklu element diyagramında Rb, Ba, Th, U, K gibi iri katyonlu litofil (LIL) elementlerde ve hafif nadir toprak elementlerde belirgin zenginleşme, Ta, Nb, Ti, Hf gibi yüksek değerlikli katyonlarda ve ağır nadir toprak elementlerde göreceli bir tüketilme görülmektedir (Şekil 6). Tüm örneklerde negatif Nb, Ta, Zr ve Ti anomalileri dalmbatma ile ilgili aktif kıtasal kenarlara benzemektedir ve iri katyonlu litofil (LIL) elementlerdeki zenginleşme, yitim bileşeni etkisiyle manto kaynağındaki metasomatizmayla açıklanabilir (Pearce, 1983).

Fraksiyonel Kristalleşme

Volkanik kayaları etkileyen fraksiyonlaşma süreçleri ana ve iz element değişimlerine göre

Çizelge 1. Hisarlıdağ volkanizması örneklerinin majör ve iz element konsantrasyonları.
Table 1. Major and trace element concentrations, for the samples from the Hisarlıdağ volcanism.

Örnek No	TH-1	TH-3	TH-18	TH-19	TH-20	TH-21	TH-22	TH-23	TH-24	TH-25	TH-28	TH-29	TH-30	TH-31	TH-37	TH-39	TH-40	TH-41	TH-42	TH-43
SiO ₂	66.59	61.20	55.23	51.63	63.42	63.27	59.97	59.32	68.53	65.99	59.08	66.57	66.24	62.39	67.13	65.26	59.76	65.54	68.51	61.65
TiO ₂	0.38	0.72	0.97	0.88	0.63	0.57	0.57	0.55	0.47	0.48	0.45	0.50	0.45	0.50	0.70	0.68	0.55	0.52	0.32	0.52
Al ₂ O ₃	16.83	17.05	16.25	19.89	15.51	16.53	16.32	15.68	15.62	16.21	14.33	17.06	15.79	16.06	17.51	15.92	16.34	15.41	15.13	16.23
FeO	2.42	3.56	7.54	7.59	5.42	6.03	6.23	5.68	4.25	4.62	4.32	3.55	4.02	5.58	0.47	4.33	5.62	3.65	2.83	5.91
MnO	0.03	0.13	0.21	0.22	0.09	0.13	0.06	0.06	0.03	0.04	0.06	0.05	0.02	0.04	0.01	0.02	0.05	0.07	0.01	0.05
MgO	0.34	0.88	1.80	2.46	1.72	0.82	1.91	0.68	0.41	0.36	0.81	0.82	0.75	1.52	0.36	0.34	1.08	0.88	0.86	1.66
CaO	1.12	2.81	6.16	9.67	5.19	3.30	4.59	6.41	2.94	3.08	7.47	3.40	3.23	4.34	1.96	1.82	5.65	3.43	2.97	4.55
K ₂ O	7.57	5.32	4.57	2.33	2.86	4.76	3.49	3.51	4.24	3.92	4.07	4.34	4.31	3.21	6.08	5.05	3.46	4.55	3.98	3.28
Na ₂ O	3.65	3.78	3.75	2.98	2.74	2.45	2.71	2.77	2.92	3.11	2.31	2.83	2.61	2.78	3.21	4.17	2.80	2.94	2.93	2.87
P ₂ O ₅	0.22	0.22	0.63	0.38	0.13	0.12	0.13	0.13	0.09	0.11	0.09	0.09	0.10	0.09	0.26	0.18	0.13	0.10	0.09	0.10
LOI	0.99	5.14	3.60	1.98	2.87	2.63	3.86	5.17	1.20	2.54	7.41	1.14	3.02	3.42	2.81	2.14	4.87	2.99	3.05	3.45
Toplam	100.13	100.81	100.69	100.01	100.58	100.61	99.84	99.96	100.68	100.45	100.41	100.34	100.54	99.92	100.50	99.91	100.31	100.08	100.66	100.24
Cr	2.4	6.1	1.3	13.8	11.7	10.8	6.3	9.0	14.0	11.7	12.1	13.9	12.7	8.8	4.4	4.7	8.9	12.5	14.5	9.9
V	53	55	181	296	158	146	157	146	70	82	95	101	105	69	59	18	149	102	105	73
Ni	2.6	3.7	1.6	12.0	6.2	6.0	5.4	4.8	5.4	4.7	5.8	6.5	8.3	4.6	2.5	3.5	5.6	6.8	6.7	6.4
Co	2.9	4.1	14.3	26.7	12.9	13.7	13.2	11.3	6.7	7.0	10.3	10.4	9.2	10.9	2.0	2.0	11.8	11.4	10.3	11.6
Cu	6.4	17.4	29.7	122.3	14.2	18.0	15.9	11.3	16.5	10.5	33.7	25.9	26.8	13.9	28.1	1.9	12.0	28.3	26.6	15.7
Zn	42.8	82.5	87.0	77.8	58.3	59.8	57.4	52.4	21.8	33.4	42.4	32.6	34.9	41.3	45.1	95.1	53.0	35.8	34.0	42.4
Ga	26.8	33.1	27.8	28.0	21.6	22.5	20.6	20.5	18.7	19.5	17.1	19.0	18.8	17.7	30.3	24.3	20.4	19.2	18.6	18.3
Rb	299.5	317.7	156.4	57.4	186.3	228.6	146.6	160.3	172.5	149.5	169.4	191.8	194.0	120.0	211.1	184.0	155.6	195.1	195.2	121.3
Sr	216	546	747	1176	371	300	316	325	303	307	293	306	304	345	376	312	321	310	305	345
Y	26.1	39.6	36.5	23.8	24.0	24.2	22.3	27.0	21.5	24.1	17.5	16.3	16.1	18.8	33.9	33.9	24.7	16.8	16.6	19.3
Zr	308	416	185	102	172	163	151	159	172	165	161	167	170	146	355	290	156	158	177	156
Nb	11.5	17.2	9.0	4.0	7.7	7.7	7.1	7.5	7.2	6.8	6.9	7.5	7.4	6.3	13.9	11.7	7.3	7.1	7.7	6.3
Cs	2.94	13.13	1.57	0.52	5.55	5.62	2.96	4.60	4.98	2.85	4.49	5.84	5.79	3.41	3.45	4.16	4.11	6.08	5.77	3.36
Ba	1034.91	1577.73	1041.38	760.09	551.90	831.96	616.24	568.00	556.84	559.32	508.12	542.98	552.50	473.17	1765.90	1029.11	574.86	555.53	549.47	471.38
La	53.2	67.5	49.5	26.4	27.6	30.6	30.7	27.7	29.0	30.0	24.1	26.0	25.6	21.1	61.7	49.3	27.8	26.7	26.0	20.6
Ce	104.5	137.5	103.8	56.5	53.5	57.6	56.7	53.3	53.3	54.0	48.1	52.0	49.5	41.2	124.7	100.9	52.0	53.8	51.1	41.0
Pr	11.85	16.31	12.95	7.38	6.27	7.24	7.05	6.20	6.89	7.46	5.43	5.84	5.54	4.75	14.67	12.15	6.25	5.99	5.76	4.71
Nd	42.83	59.50	52.57	31.12	22.99	26.77	25.75	22.94	25.55	28.13	19.43	20.81	20.66	17.93	53.16	45.99	22.64	21.48	20.98	17.48
Sm	7.34	10.94	10.39	6.80	4.72	5.22	4.88	4.38	4.97	5.60	3.73	4.18	3.88	3.55	9.46	8.88	4.48	4.25	4.18	3.63

Örnek No	TH-1	TH-3	TH-18	TH-19	TH-20	TH-21	TH-22	TH-23	TH-24	TH-25	TH-28	TH-29	TH-30	TH-31	TH-37	TH-39	TH-40	TH-41	TH-42	TH-43
Eu	1.77	2.30	2.46	1.96	1.06	1.15	1.18	1.11	1.05	1.26	0.91	0.98	0.92	0.93	2.01	2.17	1.11	0.99	0.98	0.93
Gd	6.33	9.30	9.04	6.00	4.40	5.06	4.64	4.26	4.76	5.13	3.62	3.59	3.53	3.45	8.31	7.96	4.30	3.81	3.58	3.53
Tb	0.86	1.33	1.28	0.84	0.67	0.79	0.70	0.66	0.71	0.77	0.51	0.55	0.53	0.55	1.13	1.16	0.68	0.56	0.54	0.54
Dy	4.87	7.17	7.16	4.91	4.27	4.85	4.17	4.17	3.88	4.58	3.16	3.02	2.95	3.43	6.37	6.62	4.02	3.12	3.16	3.50
Ho	0.90	1.32	1.30	0.86	0.81	0.92	0.81	0.82	0.74	0.86	0.61	0.59	0.57	0.65	1.14	1.21	0.79	0.57	0.57	0.65
Er	2.77	4.08	3.73	2.45	2.39	2.79	2.42	2.51	2.32	2.59	1.91	1.64	1.76	2.08	3.43	3.51	2.29	1.76	1.82	2.22
Tm	0.43	0.62	0.52	0.35	0.37	0.43	0.38	0.38	0.31	0.39	0.29	0.27	0.26	0.30	0.50	0.50	0.34	0.26	0.26	0.32
Yb	3.03	4.31	3.75	2.28	2.47	3.07	2.54	2.50	2.28	2.72	2.01	1.90	1.86	2.20	3.44	3.35	2.43	1.91	1.83	2.27
Lu	0.48	0.67	0.55	0.34	0.41	0.48	0.41	0.39	0.37	0.43	0.32	0.31	0.29	0.35	0.52	0.51	0.39	0.30	0.30	0.37
Hf	12.3	15.8	7.5	4.4	7.2	7.1	6.5	6.6	7.7	7.1	6.5	7.7	7.5	6.3	13.8	12.3	6.6	6.9	7.9	6.6
Ta	1.02	1.28	0.71	0.29	0.80	0.85	0.75	0.76	0.96	0.93	0.83	0.93	0.93	0.74	1.26	1.04	0.74	0.97	0.94	0.74
Pb	35.1	51.3	25.8	18.5	21.1	20.3	17.0	17.8	20.4	21.9	20.4	22.1	21.7	18.6	50.9	30.7	16.8	22.0	21.6	18.9
Th	36.9	49.8	25.6	10.5	20.9	21.6	18.3	18.5	25.3	23.8	22.7	25.5	25.0	18.2	51.6	30.8	18.0	25.5	25.0	18.0
U	8.66	12.46	4.30	3.53	5.92	5.23	4.01	3.98	4.24	5.73	5.39	7.19	7.42	3.11	12.06	4.68	3.91	7.14	7.45	3.07
Eu/Eu*	0.79	0.70	0.78	0.94	0.71	0.68	0.76	0.79	0.66	0.72	0.76	0.77	0.76	0.81	0.69	0.79	0.77	0.75	0.78	0.80

belirlenebilmektedir ve bu değişimler harker diyagramları ile gözlenebilmektedir. Daha önce Şekil 4'te bahsedildiği gibi birçok majör elementlerdeki SiO_2 artışına karşılık azalmalar bazı fraksiyasyon fazlarına işaret edebileceği gibi Rb, Ba gibi iz elementlerde gözlenen artışlar sadece fraksiyonel kristalizasyonla açıklanamaz ve bu kayaçların gelişiminde asimilasyon-fraksiyonel kristalizasyon (AFC) ve magma karışımı süreçlerinin birlikte düşünülmesi gerekmektedir.

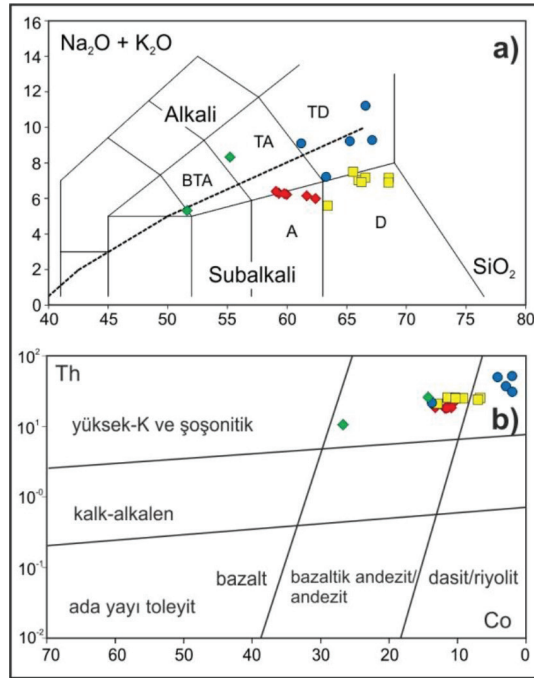
Örneklerin Eu/Eu^* değerleri 0.6-0.9 arasında olup, negatif Eu anomalisi göstermekte (Şekil 7) ve bu durum magma serilerinin oluşumu esnasında gelişen plajiyoklaz kristalizasyonu veya plajiyoklaz mineralince fraksiyonlanmaya uğramış kıta kabuğu materyali ile kirlenmeyle açıklanabilir.

İz element konsantrasyonlarındaki değişimlerle fraksiyonel kristalizasyon etkilerinin sayısal modellemesi için 'Rayleigh' eşitliği (Albarède, 2003) kullanılmış ve Rb'ye karşı sırasıyla Sr, Ba, Th, Y elementleri diyagramlarda değerlendirilmiştir (Şekil 8). Fraksiyonel kristalizasyon modellemelerinde Rb uyumsuzluğu yüksek element olduğu için fraksiyonlanma indeksi olarak kullanılmıştır. Modellemede şekilde belirtilen başlangıç bileşimi önemli olmayıp, vektörlerin yönsemesi dikkate alınmaktadır. Şekilde örneklerin Rb artışı ile birlikte Ba, Y ve Th elementlerinde pozitif bir korelasyon gözlenmekle birlikte, teorik olarak hesaplanmış fraksiyonel kristalizasyon vektörlerine göre volkanizmanın evriminde plajiyoklaz, k-feldispat, piroksen ve amfibol minerallerinin etkisinden söz edilebilir. Hisarlıdağ volkanizmasına ait kayaçlar teorik olarak oluşturulmuş, şekilde okla gösterilen mineral topluluğu ile $(\text{plj}_{[\%45]} + \text{opx}_{[\%20]} + \text{kfels}_{[\%15]} + \text{amf}_{[\%10]} + \text{cpx}_{[\%10]})$ uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 8).

Asimilasyon, Fraksiyonel Kristallenme Süreçleri

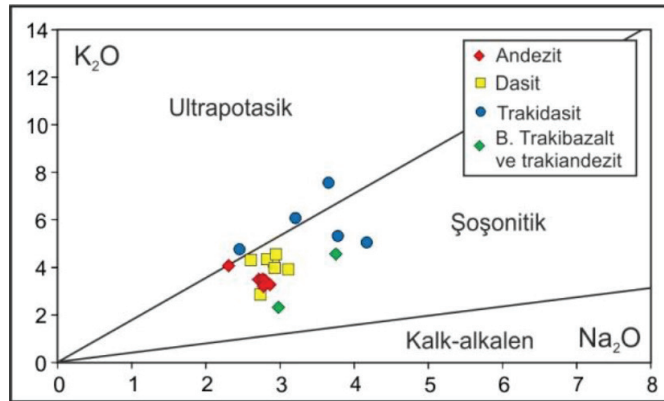
Büyük hacimli kıtasal silisik magmaların çoğunluğu, kıtasal kayaçlar ve mantodan türemiş bazaltik ergiyiklerin hibritleşmesi ile oluşur (De Paolo vd., 1992). Hibritleşmeyle oluşan kabuk ve manto karışımı için çoğu araştırmacı, kimyasal kanıtların önemli olduğunu belirtmiştir. Jeokimyasal çalışmalar, asimilasyon ile fraksiyonel kristallenmenin volkanik kayaçların farklılaşmalarındaki en önemli işlemlerin başında geldiğini göstermiştir (De Paolo, 1981; Spera ve Bohron, 2001). Mantodan türeyen magmalar kalın kabuk bölümünü geçerken asimilasyon ve bu nedenle kontaminasyondan belli derecede etkilenmektedir.

Hisarlıdağ kayaçlarına ait örneklerin petrografik ve dokusal karakteristikleri, kayaçların oluşumunda



Şekil 2. a) Volkanik kayaların toplam alkali, SiO₂ içeriklerine göre adlanması (Le Bas vd., 1986'a göre). Alkali ve subalkali magma serilerini ayıran kesikli çizgi, Irvine ve Baragar (1971)'den alınmıştır (A: Andezit, D: Dasit, BTA: bazaltik trakiandezit, TA: Trakiandezit, TD: Trakidasit). b) Volkanik kayaların Th-Co (Hastie vd., 2007) diyagramı. Tüm şekillerde aynı semboller kullanılmıştır.

Figure 2. Classification of the volcanic rocks of Hisarlıdağ. a) TAS diagram of Le Bas et al. (1986). The dashed line separating the alkali and subalkali magma series was taken from Irvine and Baragar (1971) (A: andesite; D: dacite; BTA: basaltic trachyandesite; TA: trachyandesite; TD: trachydacite). b) Th versus Co (after Hastie et al., 2007) diagram for the volcanic rocks. In all figures the same symbols are used.



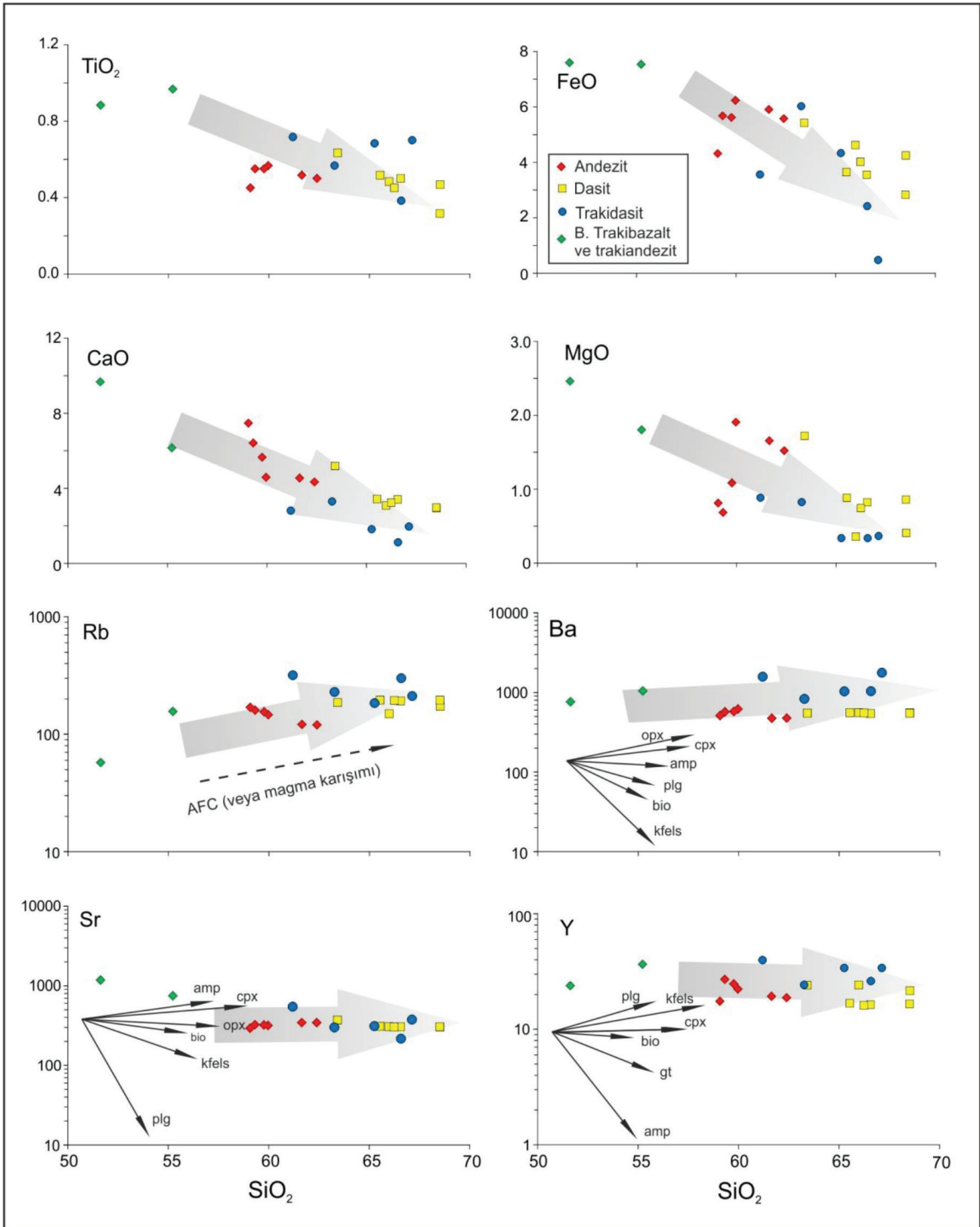
Şekil 3. Hisarlıdağ volkanik kayalarının Na₂O-K₂O diyagramı.

Figure 3. Na₂O vs K₂O diagram for volcanic rocks of Hisarlıdağ.

magma karışım sürecinin önemli rol oynadığını göstermektedir. Plajiyoklazlarda gözlenen elek dokuları, aynı kayalarda farklı jenezde bulunan plajiyoklaz kristalleri, amfibollerde reaksiyon çeperleri, kemirilmiş kuvars kristalleri karışım dokularına işaret etmektedir.

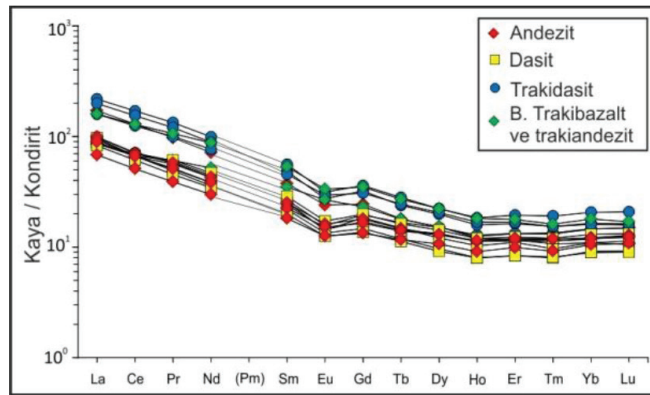
Kayaçların yüksek Ba/Nb (~71-127) ve Zr/Nb (~20-26) oranları, bu kayaçların gelişiminde değişen

derecelerde kabuksal kirlenme sürecini desteklemektedir. Kayaçlardaki böylesi jeokimyasal karakteristikler, mafik ve felsik ergiyikler arasında belli oranlarda karışımı ve bölümsel ergime derecelerindeki değişimleri işaret etmektedir. Ayrıca majör elementlerin kesiksiz yönsemeleri kayaçların aynı kaynaktan türeyerek farklılaştığını göstermektedir. Hisarlıdağ



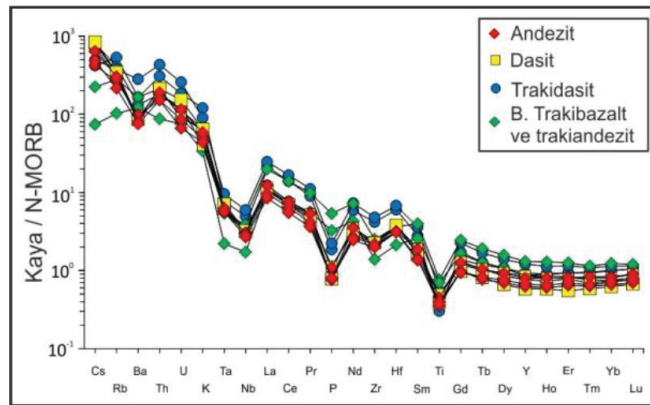
Şekil 4. Volkanik kayaların seçilmiş Harker diyagramları. Olası kristalizasyon fazlarının teorik vektörleri tek fazın %50 fraksiyonudur. Modellemede kullanılan paylaşıma katsayıları Rollinson (1993)'ten derlenmiştir. Kısaltmalar: amp= amfibol; plg= plajiyoklaz; k-fels: k-feldispat; bi=biyotit; cpx=klinopiroksen; opx=ortopiroksen.

Figure 4. Selected Harker variation diagrams of the volcanic rocks. Theoretical vectors for the likely crystallizing phases are for 50% fractionation of single phases. Partition coefficients used for the modeling are compiled from Rollinson (1993). Abbreviations: amp = amphibole; plg = plagioclase; K-feld = K-feldspar; bio = biotite; cpx = clinopyroxene; opx = orthopyroxene.



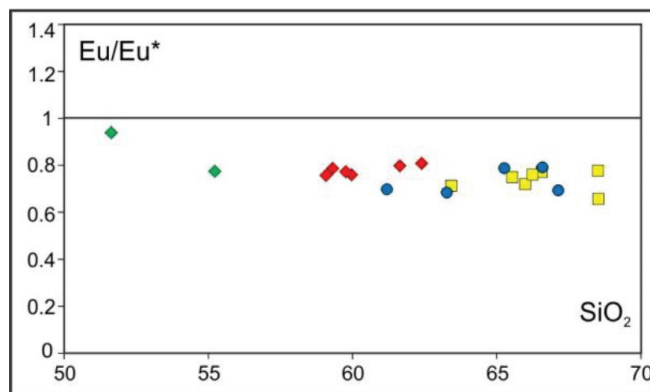
Şekil 5. Hisarlıdağ volkanik kayaların kondrite göre normalize edilmiş REE desenleri. Kondrit değerleri Boynton (1984)'ten alınmıştır.

Figure 5. Chondrite-normalized REE element patterns for the Hisarlıdağ volcanic rocks. Chondrite normalising values are from Boynton (1984).



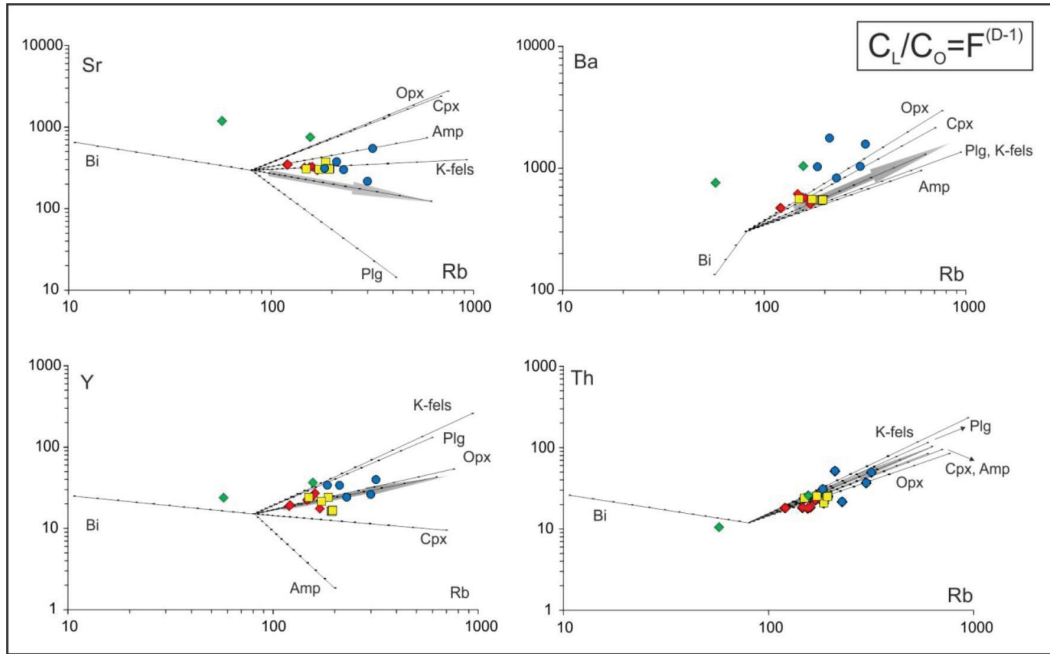
Şekil 6. Hisarlıdağ volkanik kayaların N-MORB'a göre normalize edilmiş çoklu element dağılım diyagramı. N-MORB normalize değerleri Sun ve McDonough (1989)'dan alınmıştır.

Figure 6. N-MORB normalized multi-element patterns for the Hisarlıdağ volcanic rocks. N-MORB normalising values are from Sun and McDonough (1989).



Şekil 7. Volkanik kayaların SiO_2 - Eu (Eu/Eu^*) diyagramı.

Figure 7. SiO_2 vs. Eu (Eu/Eu^*) diagram for the volcanic rocks.



Şekil 8. Volkanik kayaların petrojenez çalışmaları için kullanılan iz element diyagramları. Diyagramlar içerisinde gösterilen (a- logRb-logSr; b- logRb-logBa; c- logRb-logY; d- logRb-logTh) faz kombinasyonlarının kristalizasyonu için teorik Rayleigh fraksiyon vektörlerini göstermektedir. Vektörlerin başlangıç bileşeni Sr:300, Rb:80, Ba:300, Y:15, Th:12 olarak alınmıştır. Her bir vektör üzerindeki işaretler %5 kristalizasyon aralıklarını gösterir. Kısaltmalar: amp= amfibol; plg= plajiyoklaz; k-fels: k-feldispat; bi=biyotit; cpx=klinopirosen; opx=ortopirosen.

Figure 8. Trace element diagrams of the volcanic rocks used for the petrogenesis study. The starting composition of the vectors is taken as Sr:300, Rb:80, Ba:300, Y:15, Th:12. Diagrams showing theoretical Rayleigh fractionation vectors for crystallisation of the phase combinations indicated in the inset (a- logRb-logSr; b- logRb-logBa; c- logRb-logY; d- logRb-logTh). Thick marks on each vector are shown 5% crystallization intervals. Abbreviations: amp = amphibole; plg = plagioclase; K-feld = K-feldspar; bio = biotite; cpx = clinopyroxene; opx = orthopyroxene.

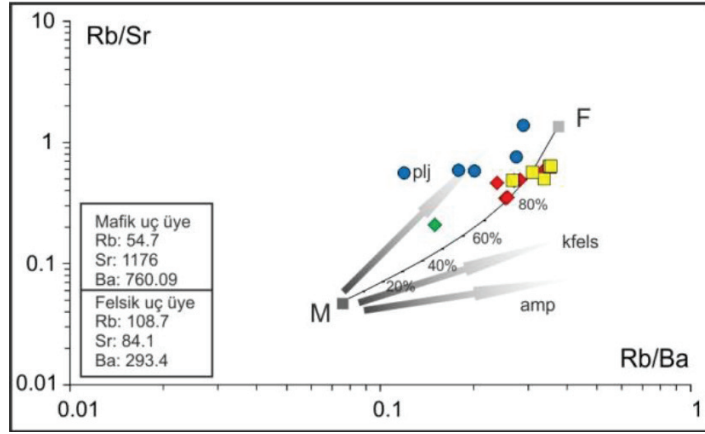
kayaçlarının oluşumunda, mafik kaynakların bölümsel ergimesiyle oluşan magmaların felsik sistemlerle karışması bu farklılaşmaya neden olarak gösterilebilir.

Hisarlıdağ volkanizmasının olası kabuk kirlenmesi bileşimlerinin hesaplanması için bölgede kabuk ve manto kayaçlarındaki iz element verileri değerlendirilmiştir. Kabuk verileri için Trakya bölgesinin temel kayaçları olan Istranca masifine ait metagranit, ve lökokratik gnayslardan (Sunal vd., 2006) yararlanılmıştır. Manto kaynağı uç bileşenleri ile ilgili çalışmalarda ise Trakya'da ortaç bileşimli olan ve iz element-izotop karakteristikleri ile metasomatize manto kaynaklı olduğu belirlenen (Ersoy vd., 2014) kayaçlardan yararlanılmıştır.

Şekil 9'da Rb/Sr - Rb/Ba diyagramı, mantodan türeyen bazaltik magmanın kabuk kirlenmesiyle birlikte değişimlerini bir karışım eğrisinde göstermektedir. Langmuir vd. (1978) tarafından oluşturulmuş eşitlikle hazırlanan şekilde örneklerin artan Rb/Sr oranları ile Rb/Ba oranlarının sistematik olarak

arttığı görülmektedir. Bu sistematik artış metasomatize mantodan türeyen ergiyik ve kabuktan türeyen felsik ergiyik arasında değişen oranlardaki karışımla açıklanabilir. Rb, Sr, Ba açısından ortalama bir bazalt bileşimine ortalama kabuk bileşiminin kademeli ilavesi hem Rb/Sr hem de Rb/Ba oranlarını arttıracaktır (Köprübaşı ve Aldanmaz, 2004). Bunun nedeni kabuk kayaçlarının Rb/Sr ve Rb/Ba oranları mantodan türeyen bazalt ergiyiklerindeki orandan çok daha yüksek olmasıdır. Model hesaplamaları bazaltik ergiyiğe en az %50 kabuktan türeyen felsik ergiyiklerin eklenmesi ile en düşük Rb/Sr ve Rb/Ba oranına sahip bileşimi üretmek için yeterli olacağını göstermektedir (Şekil 9).

Hisarlıdağ volkanizmasının gelişiminde kabuk katkısını test etmek ve değerlendirmek için Th/U oranı kullanılarak klasik AFC modellemesi (De Paolo, 1981) gerçekleştirilmiştir. Th/U oranı, bu elementlerin oldukça uyumsuz olması, kabukta yüksek oranlarda oluşu ve amfibol



Şekil 9. Volkanik kayaların Rb/Ba-Rb/Sr oranları. Veriler çoğunlukla mantodan türeyen bazalt ve kabuktan türemiş felsik ergiyikler arasındaki karışım eğrisini tanımlamaktadır. Mantodan türeyen ergiyik bileşeni bu çalışmadan alınmıştır (Th-19). Kabuk bileşeni Sunal vd., 2006'dan alınmıştır. Plajiyoklaz, K-feldispat ve amfibol fraksiyonel kristalizasyon vektörleri ayrıca gösterilmektedir.

Figure 9. Rb/Ba versus Rb/Sr ratios for volcanic rocks. The data mostly define a mixing curve between mantle-derived basalt and crust-derived felsic melts. Mantle-derived melt composition is taken from in this study (Th-19). The crustal melt is taken Sunal et al., 2006. Vectors for fractional crystallization of plagioclase, K-feldspar and amphibole are also shown.

fraksinyonundan fazla etkilenmemesi nedeniyle seçilmiştir. Ayrıca Th fraksinyon indisi olarak Th/U oranına karşı aynı diyagramda kullanılmıştır (Şekil 10).

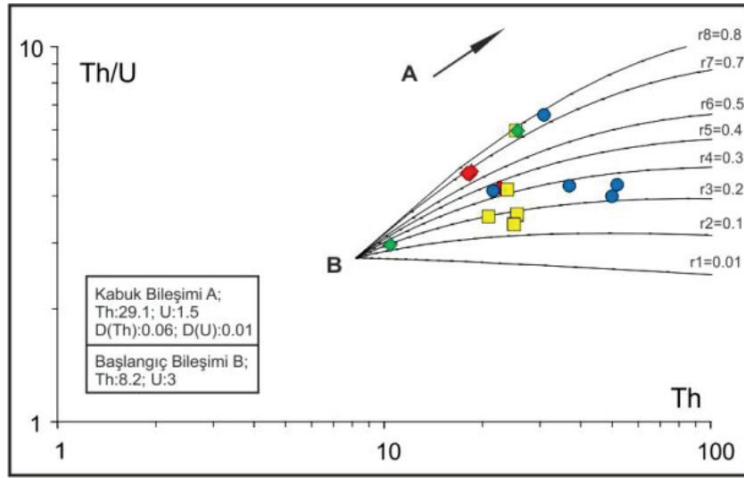
Oluşturulan Th'ye karşı Th/U diyagramına hesaplanmış teorik eğriler çizilmiştir. Eğriler üzerinde asimilasyon derecesinin kristalleşme derecesine oranı (r) ve magma kütesinin orijinal magma kütesine oranı (F) gösterilmiş ve F değerleri her eğri üzerinde %5 aralıklarla işaretlenmiştir. Ayrıca diyagramda manto ve kabuk bileşenleri ile iz element tam ayırılma katsayıları belirtilmiştir. Tam ayırılma katsayıları hesaplamalarla belirlenmiş olan $plj_{[45]} + opx_{[20]} + kfels_{[15]} + amf_{[10]} + cpx_{[10]}$ fraksiyonlanma topluluğu dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu modellemede kullanılan ayırılma katsayıları ve uç üye bileşimindeki potansiyel değişimler nedeniyle ' r ' değerleri kesin olmayabilir. Ancak ' r ' değerleri kayaların ilksel bileşime göre AFC etkilerini belirgin bir şekilde yansıtır. Örneklerin büyük çoğunluğunun teorik olarak oluşturulmuş AFC eğrilerinden $r=3-7$ arasında olması (asimilasyonun fraksiyonel kristalizasyona oranı: 0.2-0.8) ve majör ve iz element verilerinin yorumlarına da uygun olarak, özellikle andezitik kayaların yüksek oranda kabuk kirlenmesi etkilerini yansıttığı söylenebilir.

VOLKANİK KAYAÇLARIN PETROJENETİK GÖSTERGELERİ

Uyumsuz element oranlarının değişim diyagramları özellikle plaka içi ve yitim ile ilgili volkanlar gibi farklı

tektonik ortamlarda oluşan mafik magmaları ayırmak için kullanılabilir. Th/Yb - Ta/Yb oranları kristal fraksiyonlanması ve bölümsel ergime derecesinden kaynaklanan değişimlerden büyük oranda bağımsızdır ve bu oranlar manto kaynağının karakteristiğini yansıtır (ör; Pearce, 1982). Ta/Yb oranı N-MORB manto kaynağına göre manto zenginleşmesi veya tüketilmesi derecesinin bir ölçüsüdür ve Yb fraksiyonel kristallenme ile kristal birikimi etkilerini azaltmak için normalizasyon faktörü olarak kullanılır. Bununla birlikte, Şekil 11'de diyagonal manto dizisinde bulunan OIB-MORB gibi mantodan türeyen magmaları, yitim etkisiyle zenginleşmiş mantodan türemiş veya yükselimi sırasında kabuk tarafından kirlenmiş magmalardan ayırabilir. Yitim etkisi ile dalan levhadan gelen sulu sıvılarla sisteme Th eklenmesi sonucu bu etki diyagramda düşey vektör olarak görülmektedir. Hisarlıdağ volkanizmasına ait örneklerin diyagramda görüldüğü gibi yüksek Th/Yb oranları, yitim etkisi ile birlikte önemli bir kabuk kirlenmesine maruz kaldığının bir göstergesidir (Şekil 11).

Çarpışma öncesi yay magmaları, genellikle dalan sedimanlar ve üzerleyen litosferden türeyen ilave bileşenlere sahip, dalan okyanus litosferindeki dehidratasyon işlemleri sırasında açığa çıkan uçucularca zengin akışkanlar tarafından metasomatize olmuş manto kamasının ergimesinden türetilmiştir (Arculus, 1994; Nakamura ve Iwamori, 2009). Bu magmalar, HFSE ve HREE'lere göre yüksek LILE ve LREE



Şekil 10. De Paolo (1981) eşitliklerine göre Hisarlıdağ volkanik kayalar için asimilasyona duyarlı Th/U oranını kullanarak AFC modellemesi. Kabuk ve manto bileşimi sırasıyla Sunal vd., (2006) ve Ersoy vd., (2014)'ten alınmıştır.

Figure 10. Modelling of the AFC process based on the equations of De Paolo (1981) for Hisarlıdağ volcanic rocks, by using the assimilation-sensitive Th/U ratio. Crust and mantle composition are taken from Sunal et al. (2006) and Ersoy et al. (2014) respectively.

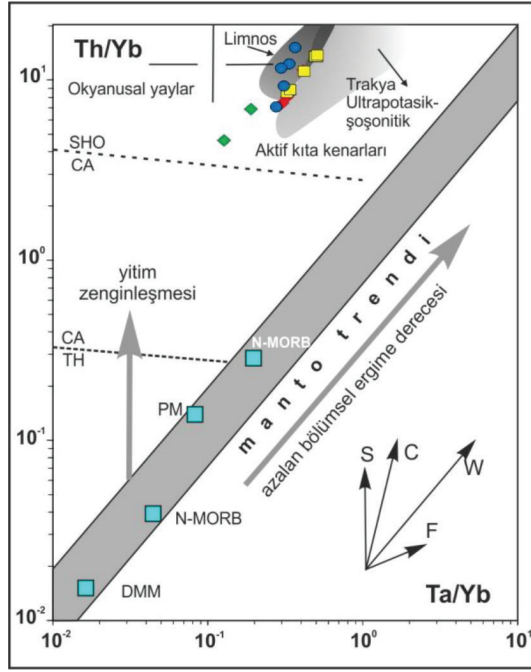
içerikleri ve negatif Nb, Ta, Hf, Zr, Ti anomalileri ile birlikte biyotit ve amfibol gibi sulu minerallerin bolluğuyla karakteristiktir (Pearce, 1982; Ringwood, 1990; Hawkesworth vd., 1991; McCulloch ve Gamber, 1991). Yitimle ilgili magmalarda LILE ve LREE zenginleşmesi dalan okyanus kabuğu veya sedimentlerden açığa çıkan akışkanların manto kaması içine girmesiyle sonuçlanabilir (Ringwood, 1990; Hawkesworth vd., 1991). HFSE'nin göreceli tüketilmesi, klorca zengin akışkanlar (Keppler, 1996), rutil ve ilmenit gibi titanyum kalıntı fazları (Green, 1981; Stalder vd., 1998) veya üzerleyen litosfer nedeniyle sulu, birincil yay magmalarının süzülmesi sırasında, manto ergiyik etkileşimi (Kelemen vd., 1990) nedeniyle.

K'ca zengin ortaçağ kayalarda Ba ve Rb'un zenginleşmesi, Ba ve Rb yüksek derecede uyumsuz element olmaları ve metamorfizma, hidrotermal alterasyon gibi işlemlerinde mobilize olabilmeleri nedeniyle yitim zonunda oluşan magmalarda gerçekleşmektedir (Arculus, 1994; Kawahata vd., 2001; Polat ve Hofmann, 2003; Jenner vd., 2009). Hisarlıdağ kayalarına ait örneklerde Ba/Nb ve Rb/Yb oranları K_2O artışı ile birlikte pozitif korelasyon göstermektedir (Şekil 12b, c).

Modern Yay ilişkili magmatizmanın jeokimyasal çalışmalarında Ba/La oranı, manto kamasına dalan levhadan türeyen malzeme ve akışkanların katkısını göstermek için kullanılır (Carr vd., 1990; Lin vd., 1990; Leeman vd., 1994; Patino vd., 2000; Jenner vd., 2009). Carr vd. (1990) Orta Amerika yayı boyunca yitim açısı ve yay lavlarının Ba/La oranı arasındaki

korelasyona işaret ederek, düşük Ba/La oranının sığ dalım sırasında üzerleyen manto kamasının büyük hacimde metasomatizmasına bağlamaktadır. Buna ilave olarak önemli derecede yüksek Ba/La oranları K'ca zengin andezitlerde dalan levhanın gerilemesiyle birlikte oluştuğunu belirtmektedir. Hisarlıdağ volkanizmasına ait kayaların nispeten küçük Ba/La değerleri Limnos örneklerine benzemektedir (Şekil 12a). Buna ilave olarak Ba/Nb oranı manto kaynak bölgesinde sıvı miktarı için bir gösterge ve yüksek su içeriğinin bir işareti olarak alınabilir (Cervantes ve Wallace, 2003).

Müller and Groves (1997) birçok potasik kayaç için kaynaktaki olası mineralin flogopit olduğunu ve flogopit içeren peridotitin ergimesinin potasyumca zengin ana magma üretebileceği ileri sürmüştür. Şoşonitlerdeki yüksek K_2O ve Na_2O içeriği, kaynak bölgesinde muhtemelen flogopit ve pargasitik hornblend gibi potasik ve sodik fazların varlığını yansıtır. K'ca zengin kayalarda Ba/Nb oranları 71-127 arasında olup, kaynak bölgesinde mevcut olan amfibol veya flogopit gibi sulu minerallerin önemli miktarda olduğunu göstermektedir (Şekil 12c). Manto ksenolitlerindeki amfiboller kısmen yüksek K, Sr, LREE, HFSE ve bazı durumlarda yüksek Ba içerikleri, fakat çok düşük Rb ve Th içerikleri gösterirken, flogopitler K, Sr, Ba ve Rb elementlerince zengin fakat REE, HFSE ve Th'ca düşük konsantrasyonlarına sahiptir (Ionov ve Hofmann, 1995; Chazot vd., 1996). Flogopitlerin K/Rb oranları 40-400 arasında değişirken amfibollerin



Şekil 11. Volkanik kayaların log Th/Yb - log Ta/Yb diagramı (Pearce, 1983). Karşılaştırma amacıyla ayrıca, tükeltilmiş MORB mantosu, ilksel manto (PM), N-MORB ve E-MORB dahil olmak üzere bazı tipik okyanusal bazaltik ve manto kompozisyonları gösterilmektedir. Karşılaştırma için kullanılan ortalama OIB ve MORB değerleri Sun ve McDonough (1989)'dan alınmıştır. Kısaltmalar; s: yitim zonu zenginleşmesi, c: kabuk kirlenmesi, w: plaka-içi zenginleşme, f: F=0.5 için fraksiyonel kristallenme, SHO: şoşonit, CA: kalk-alkalen, TH: toleyit. Karşılaştırmak için volkanik kayaların verileri Limnos (Pe-Piper vd., 2009) ve Trakya'dan (Ersoy vd., 2014) alınmıştır.

Figure 11. log Th/Yb against log Ta/Yb diagram (after Pearce, 1983) for the volcanic rocks. Some of the typical oceanic basaltic and mantle compositions including the depleted MORB mantle, primitive mantle (PM), N-MORB and E-MORB are also plotted for comparison. Average OIB and MORB values used for comparison are from Sun and McDonough (1989). Abbreviations; s: subduction zone enrichment, c: crustal contamination, w: within plate enrichment, f: fractional crystallization for F=0.5, SHO: shoshonit, CA: calc-alkaline, TH: tholeiitic. Data of the volcanic rocks for a comparison is from Limnos (Pe-Piper et al., 2009) and Thrace (Ersoy et al., 2014).

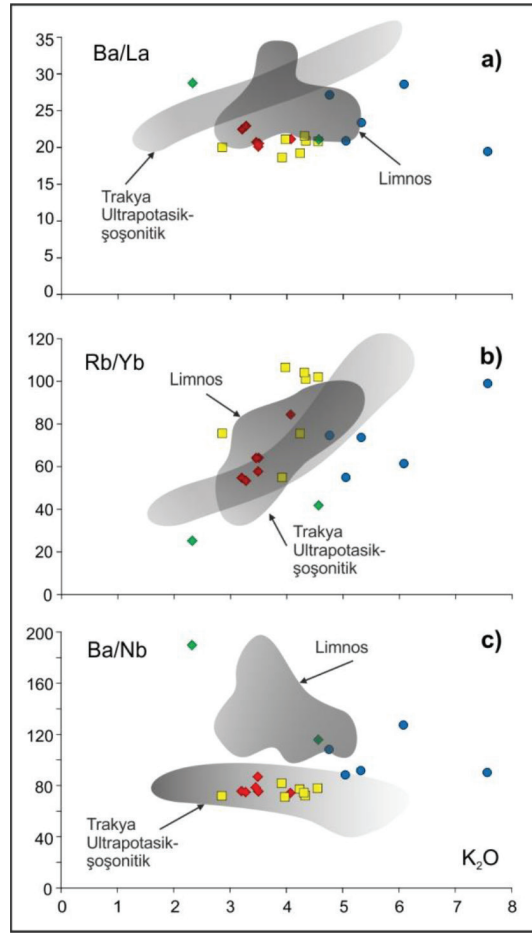
ve amfibol içeren ergiyiklerin genellikle 1000'den büyüktür (Ionov ve Hofmann, 1995). K'ca zengin andezitler kaynak bölgesinde baskın sulu minerallerin flogopit olduğunu gösteren kısmen düşük K/Rb oranları 127-336 ve HFSE bolluklara sahiptir.

Diğer taraftan, amfibol ve flogopitin göreceli uyumlulukları göz önüne alındığında ergimiş litosferik kaynaktan mevcut olan sulu fazları sınırlamak için bazı uyumsuz element oranları kullanılabilir (ör; Furman ve Graham, 1999). Örneğin, flogopit ile dengedeki ergiyikler aynı derecede bölümsel ergimede amfibol içeren ergiyikten daha yüksek Rb/Sr (>0.1) ve daha düşük Ba/Rb (<20) oranları gösterir (Furman ve Graham, 1999). Ba, Rb'ye göre flogopit içerisinde daha güçlü bir şekilde tutulduğundan (Ionov vd., 1997), kalıntı flogopitten ayrılan bölümsel ergiyikler düşük Ba/Rb oranı kazanacaktır. Diğer taraftan flogopit içeren damarların yüksek derece ergimesiyle kalıntıdan

flogopitin önemli derecede kaldırılması, Ba/Rb oranlarının arttırma eğiliminde olacaktır (Kurt vd., 2008). Hisarlıdağ volkanizmasına ait kayalar düşük Ba/Rb (2.8-8.3) ve Rb/Sr (0.1-1.3) oranları ile flogopit damarı içeren manto kaynağının düşük derece bölümsel ergimesini desteklemektedir.

JEODİNAMİK YAKLAŞIM

Hisarlıdağ volkanizmasına ait kayaların jeokimyasal karakteristikleri yüksek LILE ve REE içerikleri ile birlikte yitim veya kıtasal yaylarla ilişkili potasik kayaların jeokimyasal özelliklerine benzemektedir. Tektono-magmatik diyagramlar, Hisarlıdağ volkanizması lavları kıtasal yaylar ve yitimle ilişkili yayları işaret etmektedir (Şekil 13a, b). Foley (1992) potasik ve ultrapotasik magmaları 3 farklı grupta sınıflandırmıştır ve bu sınıflamaya göre Hisarlıdağ örnekleri aktif kıtasal



Şekil 12. Volkanik kayaların eş değişim diyagramları; a) Ba/La - K_2O ; b) Rb/Yb - K_2O ; c) Ba/Nb - K_2O . Karşılaştırmak için volkanik kayaların verileri Limnos (Pe-Piper vd., 2009) ve Trakya'dan (Ersoy vd., 2014) alınmıştır.

Figure 12. Co-variation diagrams of the volcanic rocks; a) Ba/La vs. K_2O ; b) Rb/Yb vs. K_2O ; c) Ba/Nb vs. K_2O . Data of the volcanic rocks for a comparison is from Limnos (Pe-Piper et al., 2009) and Thrace (Ersoy et al., 2014).

kenarlarla ilişkili olan III. grupta bulunmaktadır (Şekil 13c). Verma ve Verma (2013) tarafından ortaç magmatik kayalar için hareketsiz iz elementlerin kullanılması ile oluşturulan tektonik ayırtman diyagramında Hisarlıdağ volkanizmasına ait kayaların çarpışma ile ilişkili alana düştükleri görülmektedir (Şekil 13d).

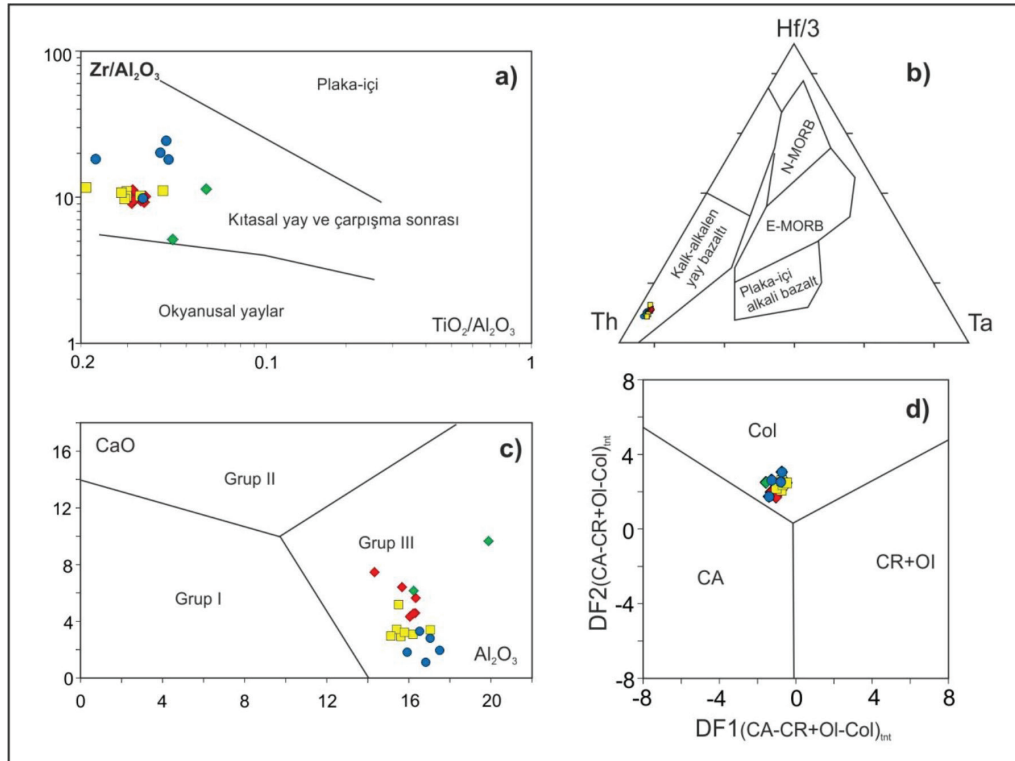
Trakya'daki Senozoyik volkanizma, Avrasya ve Afrika plakalarının bağıl yaklaşım hareketlerinin bir sonucudur. Avrasya - Afrika plakalarının Bitlis - Zagros kenet kuşağı boyunca çarpışması, Doğu Anadolu'da kabuk kısılması ve kalınlaşması ile birlikte Kuzey Anadolu Fayı ve Doğu Anadolu Fayı gibi yapısal unsurlarla Anadolu bloğunun batıya kaçışına yol açmıştır (McKenzie, 1972; Sengor vd., 1985; Taymaz vd., 1991). Türkiye'de Neotektonik dönemin başlangıcı olan bu çarpışma olayı ve sonrasında gelişen

tektonizma etkisi (McKenzie, 1972; Sengor vd., 1985) ile Anadolu'da yoğun volkanizma meydana gelmiştir (Ketin, 1983). Avrasya levhasının güney kenarında yer alan Batı Anadolu ve Trakya, Avrasya altındaki Afrika plakasının uzun süreli yitiminin hakim olduğu karmaşık bir jeodinamik geçmiş ile karakterizedir ve günümüzde yitim, Helenik ve Kıbrıs trençlerinde aktiftir (Agostini vd., 2007). Geç Kretase'den günümüze, en genci Ege yayı olan birden fazla güneye göçen magmatik kuşak oluşturmuştur (Fyticas vd., 1984). Geç Eosen - Oligosen'de magmatik aktivite Makedonya-Rodop-Kuzey Ege bölgesinde oluşmuştur (Harkovska vd., 1998; Marchev ve Shanov, 1991). Magmatik kuşak Vardar bölgesinden, kuzeybatıda Makedonya ve Sırbistan'a kadar uzanır (Bonchev, 1980; Cvetkovic vd., 1995) ve güneydoğuda Trakya Havzası ve

Batı Anadolu'da devam eder (Yılmaz ve Polat, 1998; Aldanmaz vd., 2000). Trakya ve civarında volkanizma, Üst Kretase sonrasında meydana gelen Eosen, Oligosen, Alt-Orta Miyosen zamanlarında sırasıyla yitim etkisi ve sonrasında çarpışma ile ilişkili olarak kabul edilmektedir (Ercan vd., 1995; Ercan, 1992). Kuzeydoğu Ege şoşonitik kuşağı, Ege Adaları Limnos, Lesbos, Samotkraki'deki Alt Miyosen volkanik merkezlerde ve Kuzeybatı Anadolu'da geniş bir alanda görülmektedir (Pe-Piper vd., 2009).

Üst Oligosen yaşlı Hisarlıdağ volkanizmasına ait şoşonitik kayaların uyumsuz elementlerindeki zenginleşme ve yüksek LREE/HREE oranları, tüketilmiş mantodan tek evre ergimeyle türemeyeceğini, bunun yerine yitim ile zenginleşerek metasomatize olan kıta altı litosferik manto kaynağından türemesi gerektiğini göstermektedir. Kuzey Ege'de benzer jeokimyasal özelliklere sahip Alt Miyosen şoşonitik volkanizma, dalan levhanın kırılması sonucu astenosferik

yükselime bağlanmaktadır (Pe-Piper vd., 2009). Sismik tomografi çalışmaları Helenik yitim sisteminde Neojen'de dilim kırılmasını göstermektedir (Wortel ve Spakman, 2000). Vardar-İzmir-Ankara yitim sistemi içerisinde KB Anadolu'da Erken Senozoyik magmatizmasına neden olarak benzer bir süreç önerilmiştir (Dilek ve Altunkaynak, 2007). Şoşonitik volkanizmanın zaman ve mekân dağılımı genellikle sınırlı olmakla birlikte, magmatizmanın nihai kaynağı, mantoda termal olaylarla, özellikle dilim kırılması veya alt kabuk delaminasyonu ile ilişkilidir (Kay ve Kay, 1993; Aldanmaz vd., 2000; Pe-Piper ve Piper, 2007). Bu veriler ışığında, metasomatize olmuş kıta altı litosferin delaminasyon veya dalan levhanın kırılması gibi işlemlerle sıcak astenosferle olan kontakta oluşan termal düzensizliğin neden olduğu ergime bölgedeki volkanizmaya kaynak teşkil edecek magmanın oluşumunu sağlamıştır.



Şekil 13. Volkanik kayaların tektonik ayırtman diyagramları; a) TiO_2/Al_2O_3 - Zr/Al_2O_3 diyagramı (Muller vd., 1992); b) Th-Hf/3-Ta üçgen diyagramı (Wood, 1980); c) Al_2O_3 -CaO diyagramı (Foley, 1992); d) DF1 (IA-CA-CR+OI)_{mint} vs. DF2 (IA-CA-CR+OI)_{mint} diyagramı (Verma ve Verma, 2013). Kısaltmalar: IA: ada yayı, CA: kitasal yay, CR: kitasal rift, Ol: okyanus adası ve Col: çarpışma.

Figure 13. Tectonic discrimination diagrams for the volcanic rocks. a) TiO_2/Al_2O_3 - Zr/Al_2O_3 diagram (Muller et al. 1992); b) Th-Hf/3-Ta ternary diagram (Wood 1980); c) Al_2O_3 -CaO diagram (Foley 1992); d) DF1 (IA-CA-CR+OI)_{mint} vs. DF2 (IA-CA-CR+OI)_{mint} diagram (Verma and Verma, 2013). Abbreviations: IA: island arc, CA: continental arc, CR: continental rift, Ol: ocean island, and Col: collision.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Ortaç ve asidik volkanik kayalardan ve geniş hacimli piroklastik ürünlerden oluşan Hisarlıdağ volkanizması şoşonitik karakterli olup, iz element verilerine dayanılarak oluşturulan jeokimyasal modeller, kayaların gelişiminde asimilasyon ve fraksiyonel kristalizasyon işlemlerinin önemli rol oynadığını gösterir. Bu durum petrografik olarak fenokristal topluluklarında gözlenen bir dizi dengesiz kristallenme özellikleriyle de desteklenmektedir. Ayrıca volkanolojik ve petrolojik karakteristikler, kayaların gelişimde suyun önemli bir rol oynadığını ve sulu mineral fazları barındıran, fenokristalce zengin püskürmeler ve vesiküler dokulu patlamalı ürünler içerdiğini göstermektedir.

Kayaçalarda Rb, Ba, Th, U, K gibi iri katyonlu litofil elementlerde ve hafif nadir toprak elementlerde belirgin zenginleşme, Ta, Nb, Ti, Hf gibi yüksek değerli katyonlarda ve ağır nadir toprak elementlerde göreceli bir tüketilme görülmesi, yitim bileşeni etkisi ile manto kaynağındaki metasomatizmle açıklanabilir. Metasomatize olmuş kıta altı litosferden türeyen K'ca zengin şoşonitik Hisarlıdağ volkanizması iz element verileri, volkanizmaya kaynak olarak flogopit içeren damarların varlığını yansıtmaktadır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, 2015/19 nolu projesi tarafından desteklenmiştir. Yazar, kimyasal analizlere hazırlık safhasında katkılarından dolayı Kocaeli Üniversitesi'nden Sayın Mutlu Özkan'a, kimyasal analizler için Sayın İrfan Yolcubal'a ve değerli görüşleriyle bu makaleye katkı sağlayan Sayın Ercan Aldanmaz'a teşekkür eder. Ayrıca yazar, makalenin değerlendirme aşamasında yapıcı öneri ve düzeltmeleri ile katkı sağlayan hakem Hacettepe Üniversitesi'nden Sayın Biltan Kürkçüoğlu'na, ismi belirtilmeyen hakeme ve editörlere teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Agostini, S., Doglioni, C., Innocenti, F., Manetti, P., Tonarini, S. Savaşçın, M.Y., 2007. The transition from orogenic to intraplate Neogene magmatism in Western Anatolia and Aegean area. In: Beccaluva, L., Bianchini, G. Wilson, M. (eds) Cenozoic Volcanism in the Mediterranean Area. Geological Society of America, Special Papers, 418, 1-15.

- Albarède, F., 2003. *Geochemistry: An Introduction*, Cambridge Press, 262 pp.
- Aldanmaz, E., Pearce, J.A., Thirlwall, M.F., Mitchel, J.G., 2000. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 102, 67-95.
- Aldanmaz, E., Köprübaşı, N., Gürer, Ö.F., Kaymakçı, N., Gourgaud, A., 2006. Geochemical constraints on the Cenozoic, OIB-type alkaline volcanic rocks of NW Turkey: implications for mantle sources and melting processes. *Lithos*, 86, 50-76.
- Arculus, R.J., 1994. Aspects of magma genesis in arcs. *Lithos*, 33 (1-3), 189-208.
- Atalık, E. 1992. Depositional systems of the Osmanlı formation in the Thrace Basin. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 343 s. Ankara (yayımlanmamış).
- Bonchev, E., 1980. The Transbalkan strip of post-Lutetian tectonomagmatic and metallogenic mobilisation. *Geol. Balç.*, 10 (4), 3 -34.
- Bonev, N., and Stampfli, G., 2011. Alpine tectonic evolution of a Jurassic subduction-accretionary complex: deformation, kinematics and ⁴⁰Ar/³⁹Ar age constraints on the Mesozoic low-grade schists of the Circum-Rhodope Belt in the eastern Rhodope-Thrace region, Bulgaria-Greece. *J. Geodyn.*, 52, 143-167.
- Boynnton, W.V., 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson, P. (Ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, 63-114.
- Carr, M.J., Feigenson, M.D., Bennett, E.A., 1990. Incompatible element and isotopic evidence for tectonic control of source mixing and melt extraction along the Central-American Arc. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 105 (4), 369-380.
- Cervantes, P., and Wallace, P.J., 2003. Role of H₂O in subduction-zone magmatism: new insights from melt inclusions in high-Mg basalts from central Mexico. *Geology*, 31 (3), 235-238.
- Chazot, G., Menzies, M.A., Harte, B., 1996. Determination of partition coefficients between apatite, clinopyroxene, amphibole, and melt in natural spinel lherzolites from Yemen: implications for wet melting of the lithospheric

- mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60 (3), 423-437.
- Cvetkovic, V., Harkovska, A., Karamata, S., Knezevic, V., Memovic, E., Pecskay, Z., 1995. Correlation of some Oligocene volcanic complexes along the West-east traverse in Central Balkan peninsula. *Proc. XV Congr. CBGA*, 1995, Athens, Greece, 501-505.
- De Paolo, D., 1981. Trace element and isotopic effects of combined wall rock assimilation and fractional crystallization. *Earth Planet Sci. Lett.*, 53, 189-202.
- DePaolo, D.J., Perry, F.V., Baldrige, W.S., 1992. Crustal vs. mantle sources of granitic magmas: A two parameter model based on Nd isotopic studies: *Royal Society of Edinburgh Transactions. Earth Sciences*, 83, 439-446.
- Dilek, Y., and Altunkaynak, S., 2007. Cenozoic crustal evolution and mantle dynamics of post-collisional magmatism in western Anatolia. *International Geology Review*, 49, 431-453.
- Elmas, A., 2003. Late Cenozoic tectonics and stratigraphy of northwestern Anatolia: the effects of the North Anatolian Fault to the region. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 92, 380-396.
- Elmas M.A., 2012. The Thrace Basin: Stratigraphic And Tectonic-Palaeogeographic Evolution Of The Palaeogene Formations Of Northwest Turkey. *International Geology Review*, 54, 1419-1442.
- Elmas M.A., and Şengül A., 2013. Miocene Formations And Ne-Trending Right-Lateral Strike-Slip Tectonism In Thrace, Northwest Turkey: Geodynamic Implications. *International Geology Review*, 55, 705-729.
- Ercan, T., 1992. Trakya'daki Senozoyik volkanizması ve bölgesel yayılımı. *Jeoloji Müh. Derg.*, 41, 37-50.
- Ercan, T., Satır, M., Steinitz, G., Dora, A., Sarfakioğlu, E., Adis, C., Walter, H.J., Yıldırım, T., 1995. Biga yarımadası ile Gökçeada Bozcaada ve Tavşan adalarındaki (KB Anadolu) Tersiyer volkanizmasının özellikleri. *MTA Derg.*, 117, 55-86.
- Ersoy, E.Y., Palmer, M.R., Uysal İ., Gündoğan, İ., 2014. Geochemistry and petrology of the Early Miocene lamproites and related volcanic rocks in the Thrace Basin, NW Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 283, 143-158.
- Foley, S., 1992. Petrological characterization of the source components of potassic magmas, geochemical and experimental constraints. *Lithos*, 28, 187-204.
- Fyticas, M., Innocenti, F., Manetti, P., Mazzuoli, R., Peccerillo, A., Villari, L., 1984. Tertiary to Quaternary evolution of the volcanism in the Aegean Region. In: Dixon, J.E., Robertson, A.H.F. (Eds.), *The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 17, 687-699.
- Furman, T., and Graham, D., 1999. Erosion of lithospheric mantle beneath the East African Rift system: geochemical evidence from the Kivu volcanic province. *Lithos*, 48, 237-262.
- Gill, J.B., 1981. Orogenic andesites and plate tectonics. Berlin Springer-Verlag, 390 pp.
- Görür, N., and Okay, A.İ., 1996. Fore-arc origin of the Thrace basin, northwest Turkey. *Geologische Rundschau*, 85, 662-668.
- Green, T.H., 1981. Experimental evidence for the role of accessory phases in magma genesis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 10, 405-422.
- Harkovska, A., Pecskay, Z., Marchev, P., Popov, M., 1998. How old the acid dykes of the Zvezdel swarm (Eastern Rhodopes, Bulgaria) are? *Geol. Balc.*, 28 (1-2), 69-70.
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., Mitchell, S.F., 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48 (12), 2341-2357.
- Hawkesworth, C.J., Hergt, J.M., McDermott, F., Ellam, R.M., 1991. Destructive margin magmatism and the contributions from the mantle wedge and subducted crust. *Australian Journal of Earth Sciences*, 38, 577-594.
- Ionov, D.A., and Hofmann, A.W., 1995. Nb-Ta-rich mantle amphiboles and micas - implications for subduction-related metasomatic trace-element fractionations. *Earth and Planetary Science Letters*, 131 (3-4), 341-356.
- Ionov, D.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., 1997. Volatile-bearing minerals and lithophile trace elements in the upper mantle. *Chem Geol*, 141, 153-184.

- Irvine, T.N., and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci*, 8, 448-523.
- Jenner, F.E., Bennett, V.C., Nutman, A.P., Friend, C.R.L., Norman, M.D., Yaxley, G., 2009. Evidence for subduction at 3.8 Ga: geochemistry of arc-like metabasalts from the southern edge of the Isua Supracrustal Belt. *Chemical Geology*, 261 (1-2), 82-97.
- Kasar, S., Bürkan, K., Siyako M., Demir, O., 1983. Tekirdağ- Şarköy-Keşan-Enez bölgesinin jeolojisi ve hidrokarbon olanakları. TPAO Arama Grubu Rapor No: 1771, 71s. Ankara (yayımlanmamış).
- Kawahata, H., Nohara, M., Ishizuka, H., Hasebe, S., Chiba, H., 2001. Sr isotope geochemistry and hydrothermal alteration of the Oman ophiolite. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 106 (B6), 11083-11099.
- Kay, R.W., and Kay, S.M., 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219, 177-189.
- Kelemen, P.B., Johnson, K.T.M., Kinzler, R.J., Irving, A.J., 1990. High-field-strength element depletions in arc basalts due to mantle-magma interaction. *Nature*, 345, 521-524.
- Keppler, H., 1996. Constraints from partitioning experiments on the compositions of subduction-zone fluids. *Nature*, 380, 237-240.
- Keskin, C., 1974. Kuzey Trakya Havzası'nın stratigrafisi. Türkiye İkinci Petrol Kongresi Tebliğleri Kitabı, 137-163.
- Ketin, İ., 1983. Türkiye jeolojisine genel bir bakış. İTÜ Matbaası, İstanbul, 595 s.
- Kopp, K.O., 1964. Geologie Thrakiens V: Eiglgeologische bedingungen mit bemerkungen zum Studium prachische géologie. *Erdöl und kolfleeidgas-petrocbemie*, 17, JAHRG, 9.
- Kopp, K.O., Pavoni, N., Schindler, C., 1969. Das Ergene Becken. *Beihefte Geol. Jahrbuch.*, 76, 136 s.
- Köprübaşı, N., and Aldanmaz, E., 2004. Geochemical constraints on the petrogenesis of Cenozoic I-type granitoids in Northwest Anatolia, Turkey: evidence for magma generation by lithospheric delamination in a post-collisional setting. *International Geology Review*, 46, 705-729.
- Kurt, M.A., Alpaslan, M.C., Göncüoğlu, M.C., Temel, A., 2008. Geochemistry of late stage medium to high-K calcalkaline and shoshonitic dykes in the Ulukışla Basin (Central Anatolia, Turkey): petrogenesis and tectonic setting. *Geochem Int*, 46, 1145-1163.
- Langmuir, C.H., Vocke, R.D., Jr., Hanson, G.N., 1978. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 37, 380-392.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol*, 27, 445-450.
- Leeman, W.P., Carr, M.J., Morris, J.D., 1994. Boron geochemistry of the Central-American Volcanic Arc - constraints on the genesis of subduction-related magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58 (1), 149-168.
- Lin, P.N., Stern, R.J., Morris, J., Bloomer, S.H., 1990. Nd-isotopic and Sr-isotopic compositions of lavas from the Northern Mariana and Southern Volcano Arcs - implications for the origin of island-arc melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 105 (4), 381-392.
- Marchev, P., and Shanov, S., 1991. Potassium and silica variations in the Paleogenic Macedonian-Rhodope-North Aegean Volcanic Belt: geodynamic and petrogenetic implications. *Geol. Balc.*, 21 (2), 3-11.
- McCulloch, M.T., and Gamble, J.A., 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102, 358-374.
- McKenzie, D., 1972. Active tectonics in the Mediterranean region. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 30, 109-185.
- Muller, D., Rock, N.M.S., Groves, D.I. 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: a pilot study. *Mineralogy and Petrology*, 46, 259-289.
- Muller, D., and Groves, D.I., 1997. Potassic Igneous Rocks and Associated Gold-Copper Mineralization. 3rd edition, Springer-Verlag, Berlin, pp 1-238.
- Nakamura, H., and Iwamori, H., 2009. Contribution of slab-fluid in arc magmas beneath the Japan arcs. *Gondwana Research*, 16, 431-445.

- Natalin, B.A., Sunal, G., Satir, M., Toraman, E., 2012. Tectonics of the Strandja Massif, NW Turkey: history of a long-lived arc at the northern margin of palaeo-tethys. *Turk. J. Earth Sci.*, 21, 755-798.
- Okay, A.I., Satir, M., Maluski, H., Siyako, M., Monie, P., Metzger, R., Akyüz, S., 1996. Paleoand Neo-Tethyan events in northwestern Turkey: geologic and geochronologic constraints. In: Yin, A., Harrison, M. (Eds.), *Tectonics of Asia*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 420-441.
- Okay, A.I., Satir, M., Tüysüz, O., Akyüz, S., Chen, F., 2001. The tectonics of the Strandja Massif: late-Variscan and mid-Mesozoic deformation and metamorphism in the northern Aegean. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*, 90, 217-233.
- Patino, L.C., Carr, M.J., Feigenson, M.D., 2000. Local and regional variations in Central American arc lavas controlled by variations in subducted sediment input. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 138 (3), 265-283.
- Pearce, J.A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: R.S. Thorpe (Ed.), *Andesite: Orogenic Andesite and Related Rocks*, Wiley, New York, NY, 525-548.
- Pearce, J.A., 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C.J., Norry, M.J. (Eds.), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*, Shiva. Cheshire, UK, 230-249.
- Peccerillo, A., 1985. Roman comagmatic province (central Italy): evidence for subduction-related magma geneses. *Geology*, 13, 103-106.
- Peccerillo, A., and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic-Rocks from Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58 (1), 63-81.
- Pe-Piper, G., and Piper, D.J.W., 2007. Neogene back-arc volcanism of the Aegean: New insights into the relationship between magmatism and tectonics, in Beccaluva, L., et al., eds., *Cenozoic volcanism in the Mediterranean area*. Geological Society of America Special, 418, 17-31.
- Pe-Piper, G., Piper, D.J.W., Koukouvelas, I., Dolansky, L.M., Kokkalas, S., 2009. Postorogenic shoshonitic rocks and their origin by melting underplated basalts: the Miocene of Limnos, Greece. *Geol. Soc. Am.*, 121, 39-54.
- Polat, A., and Hofmann, A.W., 2003. Alteration and geochemical patterns in the 3.7-3.8 Ga Isua Greenstone Belt. *West Greenland Precambrian Research*, 126 (3-4), 197-218.
- Ricou, L.E., Burg, J.P., Godfriaux, I., Ivanov, Z., 1998. Rhodope and Vardar: the metamorphic and the olistostromic paired belts related to Cretaceous subduction under Europe. *Geodin. Acta*, 11, 285-309.
- Ringwood, A.E., 1990. Slab-mantle interactions: 3. Petrogenesis of intraplate magmas and structure of the upper mantle. *Chemical Geology*, 82, 187-207.
- Rock, N.M.S., 1984. Nature and origin of calc-alkaline lampophyres: minettes, vogesites, korsantites, and spessartites. *Trans. Roy. Soc. Edinburgh*, 74, 193-227.
- Rogers, N.W., and Hawkesworth, C.J., 1985. The geochemistry of potassic lavas from Vulcini, central Italy, and implications for mantle enrichment processes beneath the Roman region. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 90, 244-257.
- Rogers, N.W., Hawkesworth, C.J., Matthey, D.P., Harmon, R.S., 1987. Sediment subduction and the source of potassium in orogenic leucites. *Geology*, 15, 451-453.
- Rollinson, H., 1993. *Using geochemical data*. New York, NY, John Wiley and Sons, Inc., 352 p.
- Saner, S., 1985. Saros Körfezi dolayının çökelme istifleri ve tektonik yerleşimi, Kuzeydoğu Ege Denizi, Türkiye. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 28, 1-10.
- Siyako, M., 2005. Trakya ve yakın çevresinin Tersiyer stratigrafisi. TPAO Arama Grubu Rapor No: 4608, 104 s. Ankara (yayımlanmamış)
- Siyako, M., 2006. Trakya Bölgesi Litostratigrafi Birimleri (Tersiyer Bölümü). *Stratigrafi Komitesi, Litostratigrafi Birimleri Serisi-2*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü yayını. 70 s.
- Sloman, L.E., 1989. Triassic Shoshonites from the Dolomites, northern Italy, alkaline arc rocks in a strike-slip setting. *J. Geophys. Res.*, 94, 4655-4666.
- Spera, F.J., and Bohrsen, W.A., 2001. Energy-constrained open system magmatic processes I: General model and energy-constrained

- assimilation and fractional crystallization (ECAFC) formulation. *Journal of Petrology*, 42, 999-1018.
- Stalder, R., Foley, S.F., Brey, G.P., Horn, I., 1998. Mineral-aqueous fluid partitioning of trace elements at 900–1200 C and 3.0–5.7 GPa: new experimental data for garnet, clinopyroxene, and rutile, and implications for mantle metasomatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 1781-1801.
- Sun, S.S., and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*, Geol. Soc., London, Spec. Publ. 42, 313-345.
- Sunal, G., Natal'in, B.A., Satır, M., Toraman, E. 2006. Paleozoic magmatic events in the Strandja Massif, NW Turkey. *Geodinamica Acta*, 19, 283-300.
- Sümengen, M., Terlemez, İ., Şentürk, K., Karaköse, C., 1987. Gelibolu yarımadası ve güneybatı Trakya Havzasının stratigrafisi, sedimentolojisi ve tektoniği. MTA Rap., 8128 (yayımlanmamış), Ankara.
- Sümengen, M., ve Terlemez, İ., 1991. Güneybatı Trakya yöresi Eosen çökellerinin stratigrafisi. *Maden Tetkik Arama Dergisi*, 113, 17-30.
- Şengör, A.M.C., Görür, N., Şaroğlu, F., 1985. Strike-slip deformation and related basin formation in zones of tectonic escape – Turkey as a case study. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogist Special Publication*, 37, 227-264.
- Şentürk, K., Sümengen, M., Terlemez, İ., Karaköse, C., 1998. 1/100.000 ölçekli açınısma nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları. MTA, Ankara.
- Taymaz, T., Jackson, J., McKenzie, D., 1991. Active tectonics of the central Aegean Sea. *Geophysical Journal International*, 106, 433-490.
- Ternek, Z., 1949. Geological study of the region of Keşan-Korudağ. *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi*, D12, 78s.
- Thirwall, M.F., 1988. Wenlock to mid-Devonian volcanism of the Caledonian–Applachian Orogen. In: Harris, A.I., Fettes, D.J. (Eds.), *The Caledonian–Applachian Orogen*. Geol. Soc. London Spec. Publ. 38, 415-428.
- Turgut, S., Siyako, M., Dilki, A., 1983. Trakya havzasının jeolojisi ve hidrokarbon olanakları. *Türkiye Jeoloji Kongresi Bülteni*, 4, 35-46.
- Turgut, S., Türkaslan, M., Perinçek, D., 1991. Evolution of the Thrace sedimentary basin and its hydrocarbon prospectivity. Spencer AM (ed) *Generation, accumulation, and production of Europe's hydrocarbons*. Special Publication of European Association of Petroleum Geoscientists, 1, 415-437.
- Turgut, S., and Eseller, G., 2000. Sequence stratigraphy, tectonics and depositional history in Eastern Thrace Basin, NW Turkey. *Marine and Petroleum Geology*, 17, 61-100.
- Turner, S.P., Platt, J.P., George, R.M.M., Kelly, S.P., Pearson, D.G., Norwell, G.M., 1999. Magmatism associated with orogenic collapse of the Betic-Alboran Domain, S.E. Spain. *J. Petrol.*, 40, 1011-1036.
- Ünal, O. T., 1967. Trakya jeolojisi ve petrol imkânları. TPAO Arama Grubu Rapor No: 391, 80 s. Ankara (yayımlanmamış)
- Verma, S.P., and Verma, S.K., 2013. First 15 probability-based multidimensional tectonic discrimination diagrams for intermediate magmas and their robustness against post-emplacment compositional changes and petrogenetic processes. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 22, 931-995.
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 457 pp.
- Wood, D.A. 1980. The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50, 11-30.
- Wortel, M.J.R., and Spakman, W., 2000. Subduction and slab detachment in the Mediterranean–Carpathian region. *Science*, 290, 1910-1917.
- Yılmaz, Y., and Polat, A., 1998. Geology and evolution of the Thrace volcanism, Turkey. In: Christofides, G., Marchev, P., Serri, G. (Eds.), *Tertiary Magmatism of the Rhodopian Region*. *Acta. Vulcanol.*, 10(2), 293-304.