



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 15.02.2024
Kabul Tarihi : 14.04.2024

Received Date : 15.02.2024
Accepted Date : 14.04.2024

MANTO PERİDOTİTLERİNDE KISMİ ERGİME VE METAZOMATİZMA ETKİSİ: KIZILDAĞ OFİYOLİTİ ÖRNEĞİ (HATAY, TÜRKİYE)

PARTIAL MELTING AND METASOMATISM EFFECTS IN MANTLE PERIDOTITES: THE CASE OF KIZILDAĞ OPHIOLITE (HATAY, TURKEY)

Mustafa Eren RİZELİ* (ORCID: 0000-0003-3725-3063)

A. Feyzi BİNGÖL¹ (ORCID: 0000-0000-0000-0000)

Abdullah SAR¹ (ORCID: 0000-0002-9752-7807)

Kuo-Lung WANG^{2,3} (ORCID: 0000-0002-6447-2168)

¹ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

² Yer Bilimleri Enstitüsü, Sinica Akademisi, Taipei, Tayvan

³ Ulusal Tayvan Üniversitesi, Yer Bilimleri Bölümü, Taipei, Tayvan

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mustafa Eren RİZELİ, m.erenrizeli@gmail.com

ÖZET

Kızıldağ Ofiyoliti GD Anadolu Ofiyolit Kuşağı'nda yer alır ve tabandan tavana doğru manto peridotitleri, mafik/ultramafik kümülatlar, izotropik gabrolar, levha-dayk karmaşığı, plajiyogranitler ve volkanik kayalardan oluşmaktadır. Manto peridotitlerinde yapılan detaylı arazi çalışmaları ve petrografik gözlemler neticesinde seçilen örneklerin tüm kayaç ana oksit ve iz ve NTE içerikleri belirlenmiştir. Genellikle harzburjit ve az miktarda dünitten oluşan kayaçlar taneli ve elek dokular sergilemektedir. İlkel üst mantoya bileşimine kıyasla farklı derecelerde tüketilmiş olan kayaçlar; düşük Al₂O₃, CaO, TiO₂ ve yüksek MgO içeriklerine sahiptir. Bazı örneklerde yüksek çekim alanlı elementler ve büyük iyon çaplı elementlerin bir kısmında zenginleşmeler görülmektedir. Arazide peridotitleri kesen ortopiroksenit kanallarının varlığı; petrografik olarak ikincil klinopiroksen oluşukları, kurtçuk şekilli (worm-like) piroksen-spinel simplektitler, olivinlerin spineller içinde kapanımı; jeokimyasal olarak bazı örneklerdeki iz element zenginleşmeleri (Cs, Rb, Ti, Sr, Pb, Ce, Zr/Hf ve Th/La) yiten levhadan türeyen sulu akışkanların ve ergiyiklerin metazomatizmasının bir sonucudur. Sonuç olarak Kızıldağ manto peridotitleri, %20'den fazla oranda tüketilmiş ve yitim zonu ortamını karakterize eden metazomatizma kanıtları gösteren yay önü peridotitleridir.

Anahtar Kelimeler: Jeokimya, kısmi ergime, Kızıldağ Ofiyoliti, metazomatizma

ABSTRACT

The Kızıldağ ophiolite is located in the SE Anatolian Ophiolite Belt and composed, from bottom to top, of mantle peridotites, mafic-ultramafic cumulates, isotropic gabbros, sheeted-dyke complex, plagiogranites and volcanic rocks. Based on detailed field studies and petrographic observations in mantle peridotites, selected samples' major oxide, trace, and REE contents were determined for the whole rock. The investigated rocks, generally composed of harzburgite and a small amount of dunite, display granoblastic and mesh textures. Rocks that have been depleted to different degrees compared to the composition of the primordial upper mantle have low Al₂O₃, CaO, TiO₂, and high MgO contents. Enrichments in high-field strength elements and large ion lithophile elements are observed in some samples. Presence of orthopyroxene channels cutting peridotites in the field; petrographically, secondary clinopyroxene formations, worm-like pyroxene-spinel symplectites, olivine inclusions within spinels; geochemically, trace element enrichments (Cs, Rb, Ti, Sr, Pb, Ce, Zr/Hf and Th/La) in some samples are a result of the metasomatism of aqueous fluids and melts derived from the subducted slab. As a result, Kızıldağ mantle peridotites are fore-arc peridotites that have been depleted by more than 20% and show evidence of metasomatism that characterizes the subduction zone environment.

Keywords: Geochemistry, partial melting, Kızıldağ ophiolite, mantle peridotite, metasomatism

ToCite: RİZELİ, M.E., BİNGÖL, A.F., SAR, A., WANG, K.-L. (2021). MANTO PERİDOTİTLERİNDE KISMİ ERGİME VE METAZOMATİZMA ETKİSİ: KIZILDAĞ OFİYOLİTİ ÖRNEĞİ (HATAY, TÜRKİYE). *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 908-928.

GİRİŞ

Eski okyanus kabuğunun parçaları ve mantonun üst kısmını temsil eden ofiyolitler, zaman içinde okyanus kabuğunun evrimine dair kritik ipuçları içerdiklerinden, genellikle eski okyanusların ve onların yerini alan orojenik kuşakların tektonik evrimini ortaya çıkartmak için önemli bilgiler sağlamaktadır (Furnes & Safonova, 2019; Kusky vd., 2013; Inwood vd., 2009; Dilek, 2006; Maruyama vd., 1996). Ofiyolitik birimlerden elde edilen jeokimyasal ve petrolojik veriler okyanusal havza oluşumu, deniz tabanı yayılımı, yitim olayları, söz konusu okyanusal havzanın kapanması ve sonuç olarak kıta kenarlarına yerleşmesi gibi evrelerin daha iyi anlaşılmasına ışık tutabilir (Saccani, 2015; Pearce & Robinson, 2010; Page vd., 2009; Uysal vd., 2007). Özellikle ofiyolitlerin manto kayaçları, üst mantonun zaman içindeki evrimini anlamak için magmatik süreçleri yorumlamada kullanılır.

Peridotitler okyanusal kabuğun oluşumu sırasında mantodan farklı derecelerde ergiyik ayrılımı sonucu kalan “kalıntı”yı temsil eder. Söz konusu manto kalıntılarının bileşimsel farklılıkları tektonik süreçlerdeki kısmi ergime, ergiyik taşınımı (göçü) sulu akışkan-ergiyik-manto etkileşimi gibi olaylarla ilgili çok önemli bilgiler barındırır (Birner vd., 2017; Aldanmaz vd., 2009; Parkinson & Pearce, 1998). Manto peridotitlerinin mineralojik ve jeokimyasal özelliklerinden yola çıkarak ofiyolit oluştuğu tektonik ortam hakkında yorumlar yapılabilmektedir (Hinsbergen vd., 2015; Stern vd., 2012). Ofiyolitler okyanusal yayılma bölgeleri (okyanus ortası sırtı), yay ardı ve yay önü gibi çeşitli tektonik ortamlarda oluşur. Dilek & Furnes (2014) ofiyolitleri “yitimle ilişkili” ve “yitimle ilişkisiz” olmak üzere iki farklı gruba ayırmıştır. Farklı tektonik ortamlarda oluşmuş manto peridotitlerinin mineralojik ve kimyasal bileşimindeki farklılıkların nedeni büyük ölçüde, kalıntı kayaçlardan geçen (süzülen) ergiyiklerin peridotitlerle etkileşim sonrasında gelişen metazomatizmanın bir sonucudur (Niu, 2004; Parkinson & Pearce 1998; Kelemen vd., 1997).

Araştırmacıların ofiyolitler üzerinde yaptıkları jeokimyasal çalışmalarda manto peridotitlerinden daha çok kabuk kayaçlarını seçmelerinin bazı gerekçeleri şu şekilde özetlenebilir: (a) manto peridotitlerinde görülen yüksek oranda serpantinleşme, (b) genellikle oldukça düşük iz element bileşimlerine sahip olmaları ve (c) analiz için örnek çözdürme sırasında refrakter fazların yol açtığı zorluklar. Fakat son yıllarda gelişen teknoloji ve yeni teknikler ışığında eski okyanusal litosferdeki ergiyik oluşumu, ergiyik-manto etkileşimi gibi metazomatizma olayları ve ofiyolitlerin oluşum ortamının aydınlatılmasında, üzerindeki kabuğu oluşturan ergiyiğin esas türediği kaynağı temsil eden manto peridotitler üzerine yapılan çalışmalar kilit bir rol oynamaktadır (Aldanmaz vd., 2009; Uysal vd., 2012; Niu, 2004; Pearce vd., 2000; Parkinson & Pearce, 1998; Arai, 1994; Dick & Bullen, 1984).

Bu çalışma kapsamında materyal olarak GD Anadolu Ofiyolit Kuşağı’nda Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı’nın en batı ucunda bulunan Kızıldağ (Hatay) Ofiyoliti manto peridotitlerinde detaylı saha çalışmaları akabinde alınan örneklerde detaylı petrografik çalışmalarla birlikte tüm kayaç ana oksit, iz ve NTE analizleri yapılmıştır. Tüm bu verilerden hareketle, Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitlerinin petrografik ve jeokimyasal özellikleri tartışılarak ergiyik oluşumu ve kısmi ergime (tüketilme) derecesi, sulu akışkan-ergiyik-manto etkileşimi gibi metazomatik süreçlere yorumlar getirilerek söz konusu ofiyolit oluştuğu tektonik ortam irdelenecektir.

GEREÇ VE YÖNTEM

Arazi çalışmalarında hem MTA (2002) hem de farklı araştırmacılar (Dilek & Thy, 1998; Erendil, 1984; Selçuk, 1981) tarafından hazırlanan jeolojik haritalar kullanılarak peridotitlerin dağılımı ve yan kayaçlarla olan ilişkisi irdelenmiştir. Manto peridotitlerini yayılım gösterdiği, oldukça dağlık ve sık ormanla örtülü araziye en iyi şekilde temsil edebilmesi için arazi koşullarının elverdiği ölçüde saha çalışmaları ve örnekleme gerçekleştirilmiştir. Örnekleme çalışmaları Kale-Çevlik arası, Kisecik’in kuzeybatısı ve Serinyol’un güneybatısı olmak üzere üç ana bölgede gerçekleştirilmiştir. Özellikle ileri derecede serpantinleşme gösteren, ilksel mineralojik bileşimini kaybetmiş kayaçlarda yapılan jeokimyasal analizler önemli yorumlama hatalarına neden olabileceğinden peridotitlerin yayılım sunduğu alanlar taranarak alterasyondan en az oranda etkilenmiş her biri en az 2 kg ağırlığında 26 adet peridotit örneği alınmış ve bölgenin jeoloji haritasına işlenmiştir (Şekil 1b).

Manto peridotitlerinde yapılan petrografik tayinlere göre serpantinleşme oranı en az olduğu düşünülen toplamda dokuz adet manto peridotitinin tüm kayaç ana oksit analizlerinden yedi tanesi Acme Laboratuvarı’nda (Kanada) iki tanesi (HA-9 ve HA29T) ise Ulusal Tayvan Üniversitesi (Tayvan)’de İndüktif Eşleşmiş Plazma Emisyon Spektrometresi (ICP-ES) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Lityum borat (LiBO₂) ile eritilmiş toz halindeki örnekler

(yaklaşık 2 g), çeşitli asitlerle seyreltme işlemlerine tâbi tutulmuş ve *ICP-ES* ile analiz edilmiştir. Analizlerle ilgili deteksiyon limitleri Tablo 1b'de verilmiştir.

Tüm kayaç ana oksit analizi yapılan dokuz adet manto peridotinin iz ve NTE analizleri Yer Bilimleri Enstitüsü Sinica Akademisi (Tayvan)'nde gerçekleştirilmiştir. Peridotitlerin oldukça düşük iz element bollukları ve krom-spinellerin çözünmesindeki zorluklar nedeniyle manto peridotiti örneklerinin iz ve NTE içeriklerinin tespiti için Lin vd. (2020)'nde detayı verilen İndüktif Eşleşmiş Plazma Dört Kutuplu Kütle Spektrometresi (*ICP-QMS*: Eggins vd., 1997) yönteminin optimize edilmiş bir hali kullanılmıştır. Bu yöntem özetle iki basamaktan oluşmaktadır. İlk aşamada, krom-spinelleri tamamen çözmek için HCl + HF'ye maruz bırakılan örneklerde oluşturulacak yüksek sıcaklık ve basınç koşullarına dayanabilen Ultem Soket kapaklarına sahip Teflon şişeleri kullanmıştır. İkinci aşamada, hem standartların hem de numunelerin seyreltme faktörleri, çoğu eser elementin aşırı düşük konsantrasyonunu hassas bir şekilde kalibre etmek için revize edilmiştir. Bağlı standart sapma birçok elementte %5'in altında olup ortaç NTE'ler için bu değer çoğunlukla %10-20 oranındadır. Ölçümlerin doğruluğunun belirlenebilmesi için USGS dünit standardı (DTS-1) bilinmeyen olarak analize tâbi tutulmuş ve bu değerler Tablo 1b'de verilmiştir.

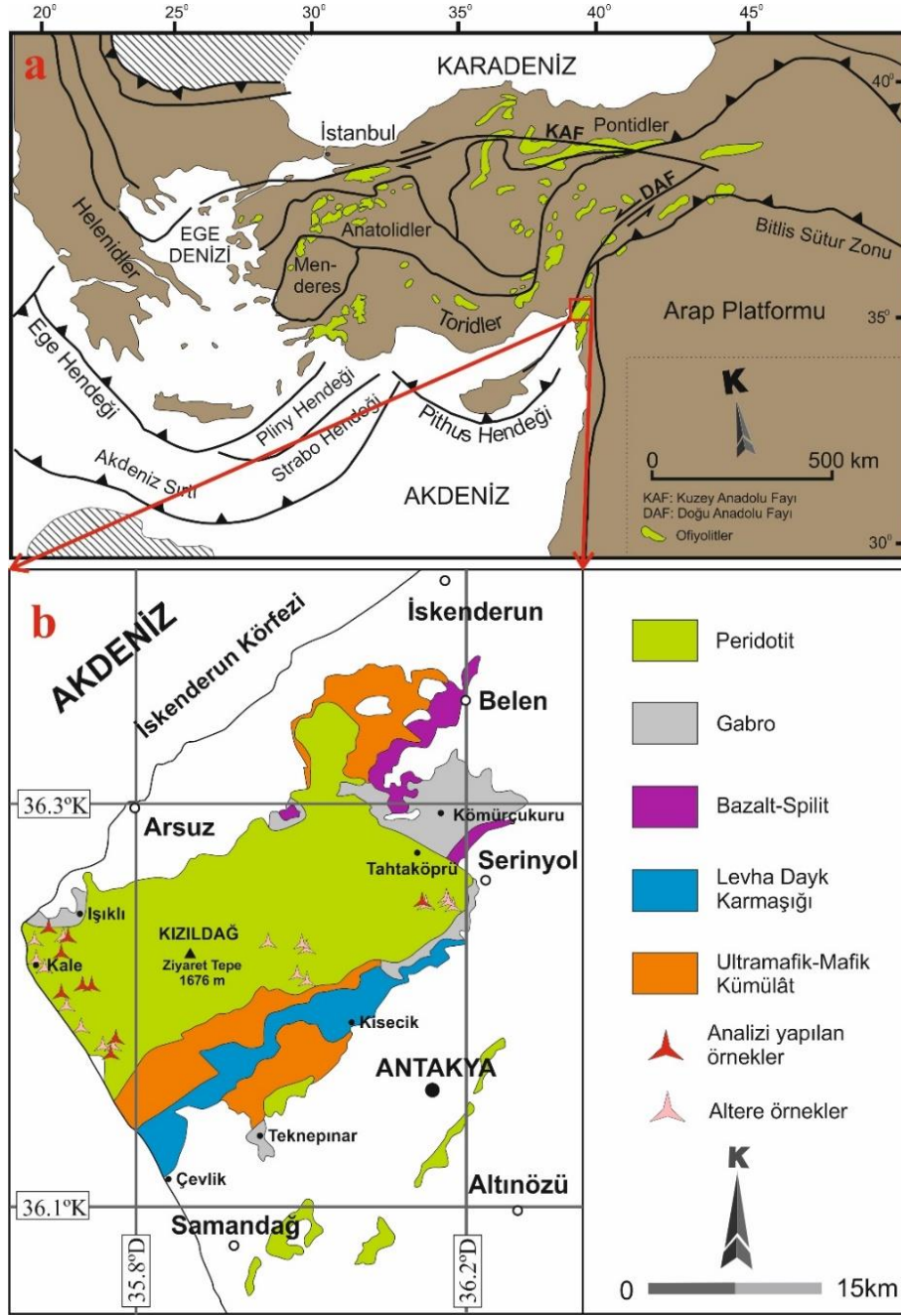
BULGULAR

Genel Jeoloji

Amanos Dağları'nın ofiyolit napları yaklaşık 1300 km²'lik bir alanı kaplayan dağmık klipler ve naplar halinde görülmektedir. Kızıldağ Ofiyoliti Amanosların en güneyinde yer alan en büyük naptır (Tekeli & Erendil, 1986). Türkiye'nin güneyinde yer alan KD-GB gidişli Kızıldağ Ofiyoliti (Şekil 1), 25 km genişliğinde, 45 km uzunluğunda, 7 km'ye kadar kalınlıkta olup ~950 km²'lik bir alanı kaplamaktadır (Tekeli vd., 1983; Tinkler vd., 1981). Kızıldağ Ofiyoliti, ideal bir ofiyolit istifinde bulunması gereken birimleri eksiksiz olarak içeren, Güney Türkiye'nin en iyi yüzeyleme veren ofiyolitlerinden biridir. Tabandan tavana doğru manto peridotitleri, mafik-ultramafik kümülatlar, izotropik gabrolar, levha-dayk karmaşığı, plajiyogranitler ve volkanik bir seriyle temsil edilmektedir (Parlak vd., 2009; Bağcı vd., 2005, 2008; Dilek & Thy, 1998; Tekeli & Erendil, 1986; Erendil, 1984; Selçuk, 1981; Tinkler vd., 1981; Şekil 1). Ofiyolitik birimler, Kambriyen-Kretase döneminde çökelmiş kalın bir şelf birimi (Arap Otoktonu) üzerine yerleşmiştir. Ofiyolit yerleşiminden sonra çökelmiş olan sığ su deniz çökeltileri, altta bulunan ofiyolit birimlerinden türeyen çakıllardan oluşan bir taban konglomerası seviyesiyle başlar. Üst kesimlere doğru, fosilli Paleosen kumlu kireçtaşları, Eosen-Erken Miyosen kireçtaşları ve geç Miyosen'de fliş tipi sedimantasyonla devam ederek ofiyoliti örtmektedir (Tekeli & Erendil, 1986).

Manto peridotitleri, Kızıldağ Ofiyoliti'nin yayılım gösterdiği engebeli iç kesimlerinde yüzeyleme vermektedir. Kızıldağ Ofiyoliti birimlerinin yaklaşık %85'ini oluşturan peridotitlerin kayaç türü, arazide kırmızı-bordo renklerde görülen, az oranda dünit bant ve mercikleri ve baskın oranda harzburjitlerdir (Şekil 2a). Peridotitlerin tabanında iri kireçtaşı blokları bulunmaktadır ve ofiyolit yerleşimi sırasında peridotitlere dahil oldukları açıklanmıştır (Tinkler vd., 1981). 3 km'den daha kalın, bol kırık çatlaklı ve farklı derecede serpantinleşmiş ve manyezitleşmiş manto peridotitleri (Şekil 2b) bazı alanlarda mafik (dolerit, pegmatitik gabro; Şekil 2c) ve ultramafik (piroksenit; Şekil 2d) dayklar tarafından kesilmektedir. Manto peridotitleri ayrıca harzburjit ve dünitleri kesen ağsı yapıda ortopiroksenit kanalları da içerir (Şekil 2e). Dilek & Furnes (2009) bu kanalların, magmanın kabuğa doğru yükselişi ve manto kaması içerisinde akışkanların dolaşmasına bağlı olarak geliştiğini açıklamaktadır. Küçük-orta boyutlu kütleler halinde görülen kromitler genellikle etrafları bir dünit zarfıyla çevrenir şekilde nodüler (Şekil 2f), bantlı-saçınımlı (Şekil 2g) ve masif şekillerde gözlenmektedir. Moho geçiş zonu olarak adlandırılan ve üst kabuk ile manto peridotitleri arasında bulunan sınırda dünitik bir zon bulunmaktadır (Bingöl vd., 2018). Bazı bölgelerde olivin gabronorit, olivince zengin gabro, traktolit ve verlit merciklerinin birkaç mm ilâ onlarca m kalınlıklara kadar değişen kütleler halinde yüzeylemektedir (Tinkler vd., 1981). Dünit, verlit, klinopiroksenit ve gabro litolojilerinin ardalanması, gabro ile moho geçiş zonu arasındaki kümülat kısmı oluşturmaktadır (Bingöl vd., 2018). Gabrolar kümülat (Şekil 2h) ve izotropik gabro türdedir. Küçük plajiyogranit kütleleri Karaçay Vadisi civarında izotropik gabroların üst kesimiyle, Çevlik civarında ise levha-dayk karmaşığı ile intrüzif olarak ilişkilidir (Bağcı vd., 2005). Genellikle diyabaz bileşimli kayaçlardan oluşan dayklar izotropik gabroları keser ve daha üst kesimde levha-dayk karmaşığı görülmektedir (Şekil 2i). Levha-dayk karmaşığı 1.5 km kalınlığında olup, esas olarak Akdeniz kıyısı boyunca 60 km²'lik bir yüzeyleme alanı kaplamaktadır (Pişkin vd., 1990; Erendil, 1984; Tekeli vd., 1983). Paralel-yarı-paralel yönelimli dayklar, ofitik-intersertal dokulu diyabaz ve kuvars-mikrodiyorit hakimdir ve plajiyoklas, klinopiroksen, amfibol, epidot, klorit, sfen, zeolit ve opak mineraller içerir (Bağcı vd., 2005). Kesme-kesilme

ilişkileri, dokusal ve bileşimsel farklılıklarına göre levha-dayk karmaşığının en az üç farklı nesil dayk sokulumundan ibaret olduğu belirlenmiştir (Dilek & Thy, 1998). Volkanik kayalar arazide genel olarak bazaltik akıntılar ve yastık yapıllı bazaltlar (Şekil 2j) şeklinde takip edilmektedir. Çeşitli bölgelerde bu volkanik kayaları kesen farklı kalınlıkta diyabaz daykları mevcuttur.



Şekil 1. a. Türkiye’deki Ofiyolitik Kayaların Dağılımı (Dilek & Flower, 2003) Yer Bulduru Haritası, b. Kızıldağ Ofiyoliti’nin Sadeleştirilmiş Jeoloji Haritası (MTA, 2002; Dilek & Thy, 1998; Tekeli & Erendil, 1986; Erendil, 1984; Selçuk, 1981)

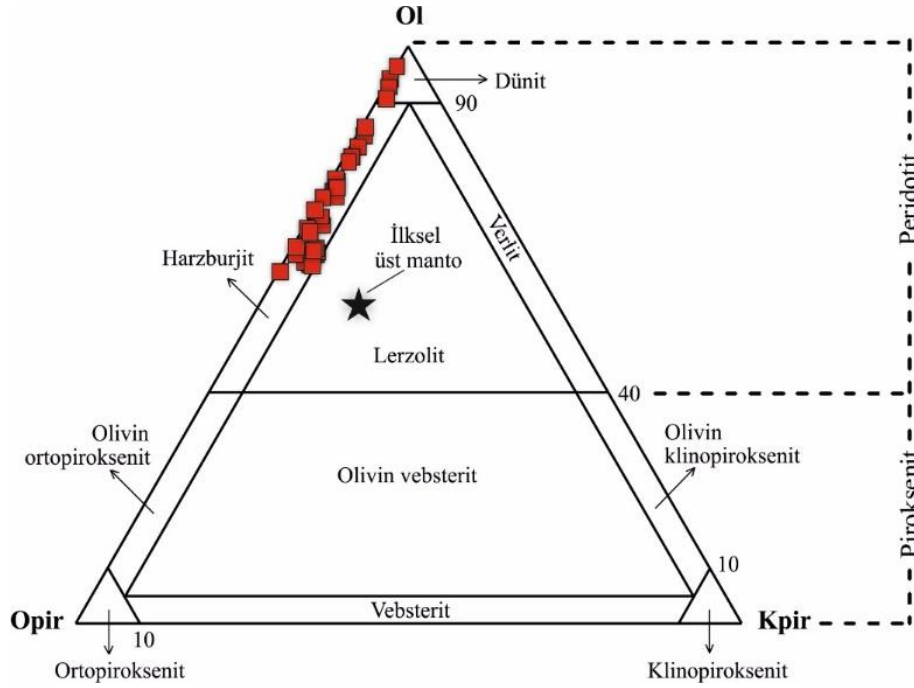


Şekil 2. Kızıldağ Ofiyoliti Kayaçlarının Genel Görünümü **a.** Harzburgit, **b.** Peridotitlerde Görülen Manyezitleşme, **c.** ve **d.** Peridotitleri Kesen Dayk ve Damarlar, **e.** Ağsı Ortopiroksenit Kanalları, **f.** Dünit-Nodüler Kromit, **g.** Dünit- Bantlı/Saçınımlı Kromitit, **h.** Kümülat Gabro, **i.** Levha-Dayk Karmaşığı, **j.** Yastık Yapılı Bazaltlar

Kızıldağ Ofiyoliti plajiyogranitlerine ait zirkon minerallerinin U-Pb ve gabrolarının Sm-Nd izokron yaş tayinlerine göre Kızıldağ Ofiyoliti magmatizma yaşı 91-92 milyon yıldır (Karaoğlan vd., 2013; Dilek & Thy, 2009). Lökogabrolardan ve harzburjitleri kesen diyabaz dayklarından yapılan zirkon U-Pb yaş tayinlerine göre sırasıyla 91 ± 1 ve $82,6 \pm 3,6$ milyon yıl yaşları elde edilmiştir (Bingöl vd., 2018). Söz konusu yaşlar, lökogabroların ofiyolit oluşumunun erken evresinde; harzburjit ve volkanik birimleri kesen bazı diyabaz dayklarının ise ofiyolit oluşumunun geç evresinde oluştuğunu göstermektedir (Bingöl vd., 2018).

Petrografi

Detaylı petrografik incelemeler sonucu Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitleri kayaç türleri genellikle harzburjit ve daha az oranda dünitten oluşmaktadır (Şekil 3). Dünit bileşimindeki kayaçlar genellikle %95-98 olivin, %5'ten az ortopiroksen, %1'den az klinopiroksen ve %2'den az oranda spinel içermektedir. Genellikle harzburjitler içinde farklı boyutlarda mercerler ve bantlar şeklinde görülen dünitler, kromit kütlelerini bir zarf gibi çevreler şekilde de görülmektedir (Şekil 2f, g). Dünitlerdeki olivin kristalleri genellikle canlı girişim renklerinde olup kenar ve çatlaklarından itibaren serpantinleşmeye maruz kaldıklarından dolayı ağsı bir görünüme (elek/mesh dokusu) sahiptir (Şekil 4a, c). Modal olarak çok düşük miktarda (<%5) ortopiroksen içeren dünitlerde spineller öz şekilsiz kristaller halinde olup bazı spinel kristallerinin, özellikle geri yansımali elektron görüntülerinde (BSE) kırıklı-çatlaklı yapısı dikkat çekmektedir (Şekil 4b).



Şekil 3. Olivin-Ortopiroksen-Klinopiroksen Sınıflama Diyagramı. Ol: Olivin, Opir: Ortopiroksen, Kpir: Klinopiroksen

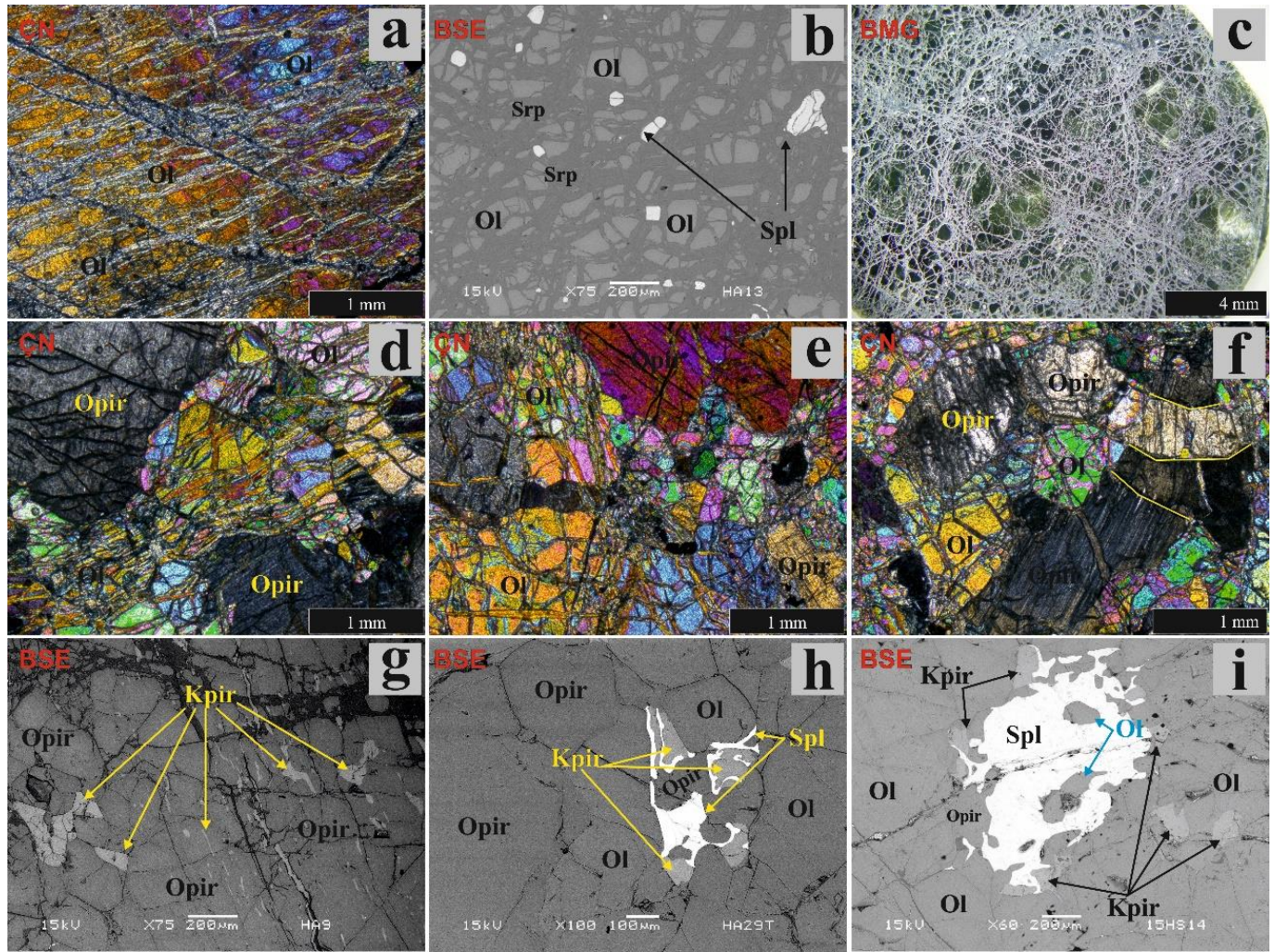
Harzburjit bileşimindeki kayaçlar modal olarak genellikle %65-85 olivin, %10-30 ortopiroksen, %4'ten az klinopiroksen, %1-2 oranında spinel içermektedir. Tıpkı dünitlerde olduğu gibi, minerallerin kenar ve çatlaklarından itibaren gelişen serpantinleşme sonucu kayaçlar ağsı bir yapı sunmaktadır (Şekil 4c, d). İnce kesit görüntülerinde canlı girişim renklerine sahip bol kırık-çatlaklı öz şekilsiz olivin kristallerinin merkez kısımları serpantinleşmeden daha az şekilde etkilenmiş olarak görülmektedir. Genellikle taneli ve elek doku gözlenen kayaçlarda, daha az kırık-çatlaklı, tek yönde belirgin dilinim gösteren gri girişim renklerine sahip ortopiroksen mineralleri yarı öz şekilliden öz şekilsiz kadar değişen şekillerde gözlenmektedir (Şekil 4d, e). Ortopiroksen kristallerinde, maruz kaldıkları plastik deformasyon nedeniyle (Mercier & Nicolas, 1975) bükülmüş/eğilmiş dilinimleriyle kristal içi kayma (kinkbant) yapıları görülmektedir (Şekil 4f). Klinopiroksenlere, ince kesit görüntülerinde çok nadir rastlanmakta olup genellikle bu mineraller BSE çalışmalarında gözlemlenmiştir (Şekil 4g, h, i). Ayrıca klinopiroksenler ortopiroksenlerin içinde, olivin ve spinellerin çevresinde ikincil olarak bulunmaktadır (Şekil 4h). Hacimsel olarak en az miktarda bulunan spinel mineralleri bazı örneklerde kurtçuk şekilli olarak (worm-like) piroksen ve olivinlerle

birlikte gözlenmektedir (Şekil 4h; Rizeli, 2020). BSE görüntülerinde bazı spinel fazlarının içerisinde olivin kapantılarına rastlanmaktadır (Şekil 4i).

Tüm Kayaç Ana Oksit Jeokimyası

Çeşitli oranlarda serpantinleşmiş manto peridotitlerinin ateşte kayıp (AK) değerleri %11'den az olup Al_2O_3 ve CaO içerikleri açısından ilksel üst manto değerlerine ($Al_2O_3 = \%ağ. 4,49$ ve $CaO = \%ağ. 3,65$; Palme & O'Neill, 2014) kıyasla farklı oranlarda tüketilmiştir.

CaO ve Al_2O_3 içerikleri sırasıyla %ağ. 0,15-0,92 ve 0,37-0,93 aralığında değişen manto peridotitlerinin TiO_2 içerikleri genelde deteksiyon limitinin (%0,01) altında olmakla birlikte, ölçülebilen en büyük değer %ağ. 0,012'dir. Söz konusu örneklerin MgO değerleri %ağ. 39,85-44,88 aralığında iken, Fe_2O_3 değerleri %ağ. 7,85-9,79 aralığında değişmektedir (Tablo 1a). MgO değerlerine karşılık bazı ana oksit değerlerindeki dağılım doğrusal ölçekte verilmiştir (Şekil 5). Manto peridotitlerinin artan tüm kayaç MgO değerlerine karşılık TiO_2 içeriğinde herhangi bir yönseme görülmezken; SiO_2 ve CaO içeriklerinde belirgin, Al_2O_3 'te hafif bir negatif yönseme bulunmaktadır (Şekil 5).



Şekil 4. Kızıldağ Ofiyoliti'ne ait Dünit ve Harzburjitlelerin Polarizan Mikroskop, BSE ve BMG Görüntüleri. Dünitlerde Gözlenen **a.** Elek (*Mesh*) Doku ve **b.** Öz Şekilsiz, Kırık-Çatlaklı Spineller. Harzburjitlelerde **c.** BMG'de Görülen Ağsı Yapı, **d.** **e.** Taneli Doku, **f.** Plastik Deformasyona Bağlı Ortopyroksenlerde Gelişen Kristal İçi Kayma Yapıları, **g.** Ortopyroksenler İçinde İkincil Klinopyroksenler, **h.** Olivin ve Spinel Kristallerinin Etrafında Oluşan İkincil Klinopyroksen ve Kurtçuk Şekilli (*Worm-like*) Öz Şekilsiz Spineller, **i.** Spinel İçerisindeki Olivin Kapantıları. Ol: Olivin, Opir: Ortopyroksen, Kpir: Klinopyroksen, Spl: Spinel, BMG: Binoküler Mikroskop Görüntüsü, BSE: Geri Yansımali Elektron Görüntüsü, ÇN: Çapraz Nikol

Tablo 1a. Kızıldağ Ofiyoliti'ne Ait Manto Peridotitlerinin Tüm Kayaç Ana Oksit (%ağ.) İçerikleri.
AK: Ateşte Kayıp, dl: Deteksiyon Limiti, dla: Deteksiyon Limitinin Altında, a.y.: Analiz Yok

Litoloji	Dünit	Harzburjıt								% dl
		HA13	HA9	HA15	HA22	HA23	HA26	HA29T	HA32	
Örnek #	HA13	HA9	HA15	HA22	HA23	HA26	HA29T	HA32	15HS32-2	% dl
SiO ₂	34,68	41,90	38,13	42,24	45,21	39,46	43,37	42,35	38,5	0,01
TiO ₂	dla	0,012	dla	dla	dla	dla	0,010	dla	dla	0,01
Al ₂ O ₃	0,53	0,60	0,54	0,56	0,93	0,54	0,45	0,55	0,37	0,01
Fe ₂ O ₃	8,45	9,31	7,85	8,45	8,43	8,14	9,79	8,88	8,05	0,04
MnO	0,11	0,14	0,11	0,12	0,12	0,11	0,14	0,12	0,11	0,01
MgO	43,8	44,88	42,14	42,18	41,17	43,62	45,01	44,41	39,85	0,01
CaO	0,15	0,87	0,61	0,72	0,92	0,68	0,88	0,65	0,71	0,01
Na ₂ O	dla	0,00	dla	dla	dla	dla	0,00	dla	dla	0,01
K ₂ O	dla	0,00	dla	dla	dla	dla	0,00	dla	dla	0,01
P ₂ O ₅	dla	0,03	dla	dla	dla	dla	0,03	dla	dla	0,01
Cr ₂ O ₃	0,68	a.y.	0,36	0,44	0,44	0,39	a.y.	0,36	0,42	0,002
AK	10,6	2,9	9,3	4,3	1,8	6,1	0,2	1,6	11,0	
Toplam	99,00	100,68	99,04	99,01	99,02	99,04	99,91	98,92	99,01	
Mg#	90,24	89,58	90,54	89,90	89,70	90,52	89,13	89,92	89,82	

$$Mg\# = 100 \times (MgO/40,30) / [(MgO/40,30) + (Fe_2O_3/71,85)]$$

Tablo 2b. Kızıldağ Ofiyoliti'ne Ait Manto Peridotitlerinin Tüm Kayaç İz Element ve NTE (ppm) İçerikleri. dla: Deteksiyon Limitinin Altında, a.y.: Analiz Yok

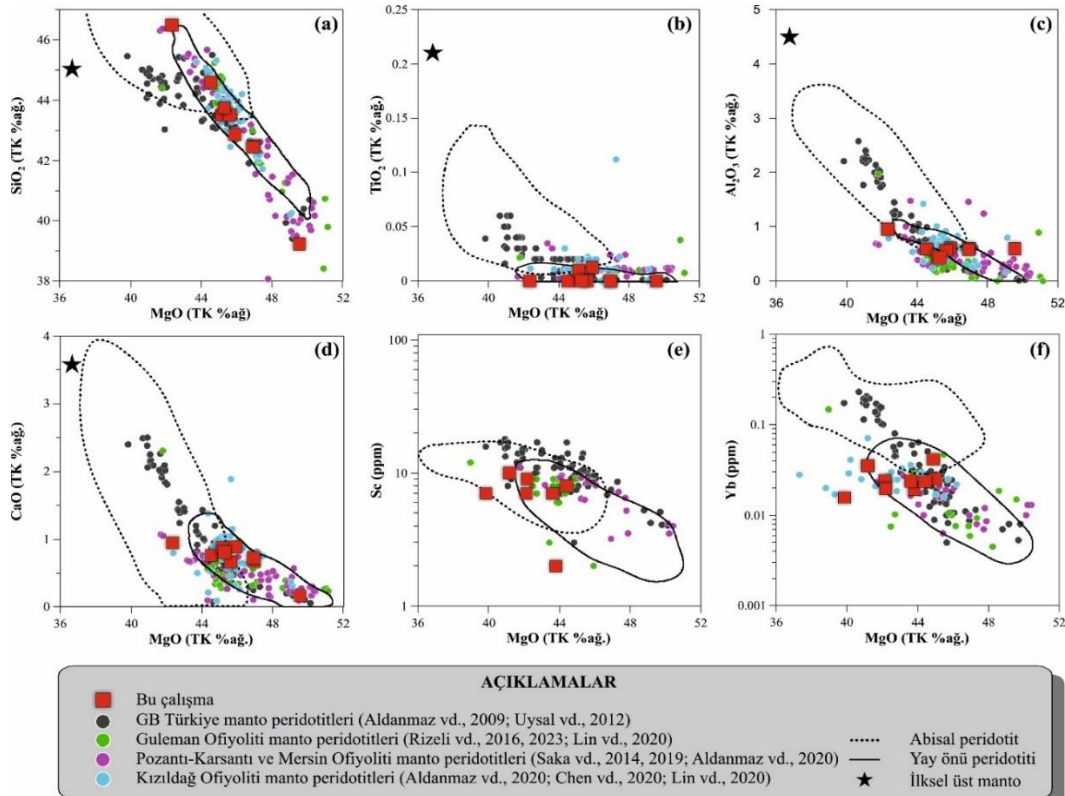
Litoloji	Dünit	Harzburjıt								Dünit Standardı	
		HA13	HA9	HA15	HA22	HA23	HA26	HA29T	HA32	15HS32-2	DTS-1 Bu çalışma
Örnek#	HA13	HA9	HA15	HA22	HA23	HA26	HA29T	HA32	15HS32-2	DTS-1 Bu çalışma	DTS-1 Jochum vd. (2016)
İz Element (ppm)											
Ti	33,1	42,8	20	14,5	39	19,6	18,8	17,2	15,5	a.y.	a.y.
Ni	2328	a.y.	2057	2347	2250	2161	a.y.	2482	2207	a.y.	a.y.
Sc	2	a.y.	7	9	10	7	a.y.	8	7	a.y.	a.y.
Cs	0,0008	0,0010	0,0010	0,0013	0,0015	0,0014	0,0005	0,0020	0,0042	0,0063	0,0060
Rb	0,0068	0,0167	0,0091	0,0096	0,0184	0,0118	0,0076	0,0147	0,0865	0,0676	0,0660
Ba	0,0961	0,4199	0,1119	0,0486	0,0466	0,0605	0,1899	0,0844	0,4376	0,3314	0,3420
Sr	0,1390	1,2587	0,9247	0,0975	0,1348	0,2105	0,1108	0,1041	0,3277	0,3125	0,3000
Zr	0,0450	0,0067	0,0268	0,0037	0,0121	0,0070	0,0048	0,0034	0,2443	0,1481	0,1530
Y	0,0672	0,1407	0,0664	0,0339	0,0776	0,0644	0,0460	0,0460	0,0448	0,0417	0,0363
Hf	0,0019	0,0007	0,0010	0,0004	0,0006	0,0006	0,0004	0,0003	0,0061	0,0046	0,0053
Th	0,0006	0,0003	0,0010	0,0003	0,0005	0,0006	0,0005	0,0003	0,0122	0,0092	0,0098
Pb	0,0166	0,0343	0,0247	0,0219	0,0264	0,0258	0,0216	0,0212	0,0303	7,6600	a.y.
U	0,0010	0,0008	0,0014	0,0008	0,0013	0,0008	0,0010	0,0006	0,0030	0,0045	0,0032
Nb	0,0139	0,0206	0,0087	0,0304	0,0436	0,0221	0,0697	0,0239	0,0284	0,0165	0,0154
NTE (ppm)											
La	0,0021	0,0005	0,0020	0,0059	0,0009	0,0015	0,0011	0,0005	0,0336	0,025	0,026
Ce	0,0047	0,0013	0,0045	0,0013	0,0020	0,0032	0,0021	0,0013	0,0675	0,052	0,050
Pr	0,0008	0,0002	0,0007	0,0002	0,0003	0,0004	0,0003	0,0002	0,0081	0,007	0,006
Nd	0,0045	0,0011	0,0033	0,0007	0,0011	0,0020	0,0010	0,0008	0,0299	0,025	0,023
Sm	0,0022	0,0007	0,0015	0,0004	0,0005	0,0010	0,0005	0,0005	0,0059	0,005	0,004
Eu	0,0014	0,0004	0,0009	0,0001	0,0002	0,0006	0,0002	0,0003	0,0013	0,001	0,001

Gd	0,0034	0,0021	0,0021	0,0004	0,0007	0,0021	0,0004	0,0005	0,0056	0,005	0,000
Tb	0,0009	0,0010	0,0006	0,0002	0,0004	0,0006	0,0002	0,0002	0,0008	0,001	0,001
Dy	0,0080	0,0133	0,0069	0,0025	0,0059	0,0066	0,0033	0,0033	0,0051	0,005	0,005
Ho	0,0023	0,0047	0,0024	0,0011	0,0026	0,0022	0,0015	0,0016	0,0016	0,001	0,001
Er	0,0096	0,0208	0,0103	0,0068	0,0137	0,0103	0,0086	0,0084	0,0066	0,005	0,005
Tm	0,0021	0,0046	0,0025	0,0018	0,0035	0,0023	0,0023	0,0023	0,0016	0,001	0,001
Yb	0,0194	0,0415	0,0245	0,0196	0,0355	0,0238	0,0252	0,0237	0,0157	0,010	0,010
Lu	0,0042	0,0084	0,0053	0,0045	0,0074	0,0051	0,0058	0,0053	0,0036	0,002	0,002

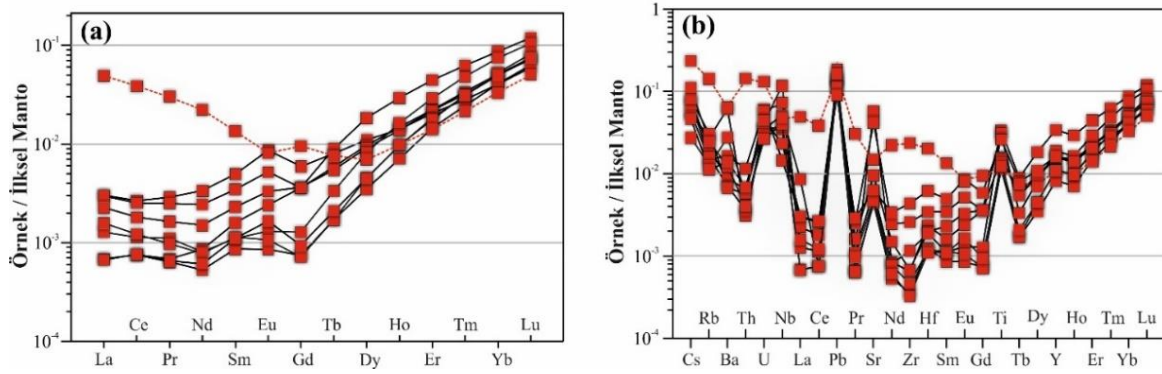
Tüm Kayaç İz ve NTE Jeokimyası

Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitlerinden tüm kayaç iz ve NTE analizleri sonuçları Tablo 1b’de gösterilmiştir. Artan MgO içeriği karşısında kısmi ergime sırasında uyumsuz davranış sergileyen Yb ve Sc elementleri negatif bir yönseme göstermektedir. Tüm kayaç iz ve NTE değerleri Palme & O’Neill (2014)’in ilksel manto değerlerine oranlanarak NTE ve çoklu element diyagramları oluşturulmuştur (Şekil 6). Manto fazlarında ağır NTE’ler hafif NTE’lere kıyasla daha uyumlu davranış sergilemektedir. Şekil 6’da manto peridotitlerinin ağır NTE özelliğindeki Lu, Yb ve Tm gibi elementlerinin ilksel mantoya oranlandıklarında 10 kat ve daha fazla oranda tüketildikleri görülmekteyken ağır NTE içerikleri ise genellikle 100 kattan daha fazla oranda tüketilmiştir. Yalnızca bir örneğin hafif NTE’leri diğerlerinden ayrı olarak daha az oranda tüketilmiş/sonraki süreçlerde zenginleşmiştir. Ağır larda ortaç NTE’lere doğru belirgin bir negatif bir yönseme varken ortaçlardan hafif NTE’lere doğru çoğunlukla yataya yakın düşük oranda da negatif yönseme görülmektedir. Yalnızca bir örnekte pozitif bir yönseme görülmektedir. Söz konusu 15HS32-2 örneği diğer örneklerle karşılaştırıldığında ilksel mantoya göre özellikle ortaç ve hafif NTE’leri açısından daha az tüketildiği veya sonraki süreçlerde metazomatizmaya uğradığı düşünülmektedir (Şekil 6a).

Uyumsuz karakterlerinden ötürü büyük iyon çaplı elementlerinden Th, Ba, Rb ve Cs ilksel mantoya oranlandıkları desenlerde çoğunlukla 10 kat ve daha fazla oranda tüketilmiştir. Bu elementler (Th, Ba, Rb ve Cs) çoklu element diyagramında, manto fazlarında kısmen daha uyumlu davranış sergileyen ortaç NTE’lere kıyasla önemli derecede zenginleşme göstermektedir. Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitleri belirgin bir pozitif Ti, Sr, U ve Pb anomalileri göstermektedir (Şekil 6b).



Şekil 5. Kızıldağ Ofiyoliti’ne Ait Manto Peridotitlerinin Tüm Kayaç MgO bileşimlerinin SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, CaO, Sc, Yb ve Y ile karşılaştırılması. Abisal ve Yay Önü Peridotit Alanları Sırasıyla Niu vd. (1997) ve Parkinson & Pearce (1998)’ten, İlksel Üst Manto Bileşimi ise Palme & O’Neill (2014)’den Alınmıştır.



Şekil 6. Kızıldağ Ofiyoliti'ne Ait Manto Peridotitlerinin Palme & O'Neill (2014)'in İlkse Manto Değerlerine Oranlanan a. NTE ve b. Çoklu Element Diyagramları

TARTIŞMA

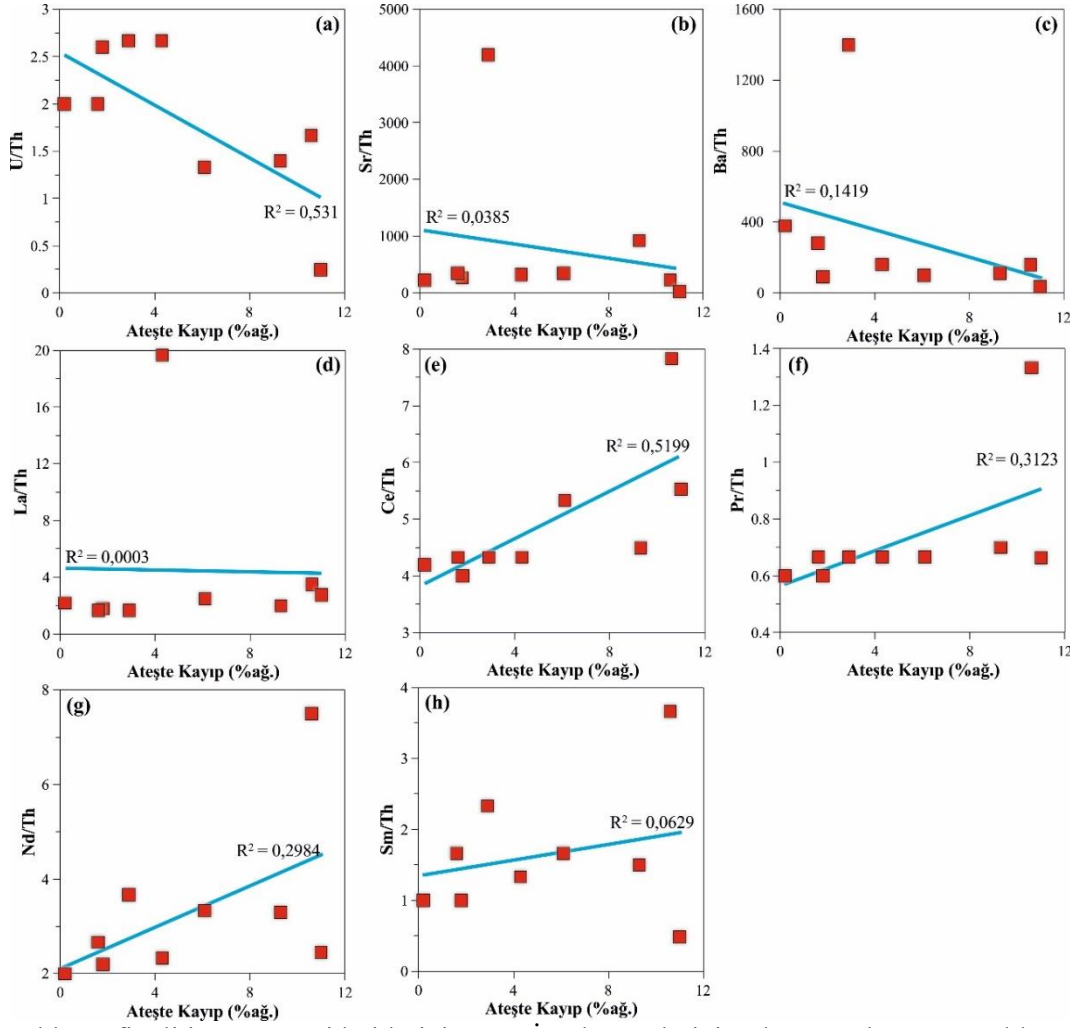
Serpantinleşmenin İz Elementler Üzerindeki Etkisi

Manto peridotitleri genellikle farklı derecelerde serpantinleşmeye maruz kalırlar ve bu durum peridotitlerin ilksel bileşimlerinin, ana oksit bileşimlerinden ziyade iz elementleri açısından değişime uğramasına neden olmaktadır. Dolayısıyla jeokimyasal yorumlamalarda söz konusu elementlerin serpantinleşme süreçlerinden ne ölçüde etkilendiğinin değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Manto peridotitlerindeki kısmi ergime süreçlerinin doğasını anlamak için, ergime sonrası düşük sıcaklık alterasyonu süreçlerinden (ör. serpantinleşme) en az derecede etkilenen (Niu, 2004; Pearce vd., 2000) elementlerden olan yüksek çekim alanlı elementlerin (Ti, Nb, Ta, Zr, Hf, Y, Th, Al ve ağır NTE) manto fazları hakkında önemli bilgiler sağladığı bilinmektedir (Frisby vd., 2016).

Deneysel çalışmalar hidrotermal süreçlerin diğer bazı elementlerin hareketli olmasına yol açtığını gösterse de (özellikle NTE'ler; Allen & Seyfried, 2005) bazı çalışmalar yüksek derecede serpantinleşmeye maruz kalan peridotitlerin halen ilksel bileşimleri yansıttıklarını göstermektedir. Frisby vd. (2016) Güneybatı Hint Sırtı'ndaki (SWIR) serpantinleşmiş abisal peridotitlerde, serpantinleşmenin ana mineral fazlarının iz elementleri üzerindeki etkileri ortaya çıkarılmaya çalışmıştır. Bu çalışmada araştırmacılar deniz suyunun akışkan-hareketli (*fluid-mobile*) elementler (B, Ba, U, Sr, Pb) yanı sıra hafif NTE'leri de serpantinleşmiş peridotitlerin bünyesine katabileceğini göstermişlerdir (Frisby vd., 2016). NTE'lerin ilksel manto değerlerine oranlandıkları diyagramlarda negatif Ce anomalisi görülebilir (deniz suyunun tipik bir özelliğidir; Elderfield & Greaves, 1982). Dolayısıyla bu çalışmada serpantinleşme süreçlerinde hareketli olabilecek hafif NTE'lerin (La, Ce, Pr, Nd ve Sm) ve akışkan-hareketli (*fluid-mobile*) elementlerin (U, Sr ve Ba) davranışları birlikte değerlendirilerek söz konusu elementlerin jeokimyasal yorumlamadaki güvenilirlikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitleri herhangi bir Ce anomalisi görülmemektedir (Şekil 6a). Şekil 7'de seçilen iz elementler hareketsiz karakterdeki Th elementine oranlanarak serpantinleşme ve alterasyon olaylarının bir göstergesi olarak kabul edilen AK değerlerine göre dağılım diyagramları çizilmiştir. Söz konusu diyagramda akışkan-hareketli (*fluid-mobile*) elementlerden U'nun Kızıldağ peridotitlerinin AK içerikleriyle orta dereceli bir korelasyona ($R^2=0,531$) sahip olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 7a). Bu da serpantinleşme sırasında sistemden U'nun uzaklaştığı (negatif ilişki) anlamına gelmektedir. Dolayısıyla söz konusu elementin jeokimyasal yorumlamalarda kullanılması konusunda çok dikkatli olunmalıdır. Sr ve Ba elementlerinin beklenenin aksine AK ile herhangi bir korelasyon göstermemesi (sırasıyla $R^2=0,0385$ ve $R^2=0,1419$) söz konusu elementlerin serpantinleşme süreçlerinden etkilenmediklerine işaret eder (Şekil 7b ve c).

Hafif NTE'lerden Ce elementi AK değeri ile orta derecede ($R^2=0,5199$) bir korelasyon gösterirken (Şekil 7e) diğer hafif NTE'lerde önemli bir korelasyon görülmemektedir ($R^2<0,3123$; Şekil 7d, f, g ve h). Dolayısıyla Ce'nin serpantinleşme süreçlerinde sisteme eklendiği düşünüldüğünden (pozitif ilişki) Ce dışındaki diğer hafif NTE'lerin jeokimyasal yorumlamalarda dikkate alınması daha mühimdir.



Şekil 7. Kızıldağ Ofiyoliti Manto Peridotitlerinin Bazı İz Elementlerinin Th'a Oranlarına Karşılık Ateşte Kayıp Değerlerinin Değişim Diyagramları

Kısmi Ergime ve Metazomatizma Süreçleri

Baskın olarak harzburjüt bileşimli kayalardan oluşan Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitleri, farklı oranlarda serpantinleşmeye maruz kalmış ve petrografik olarak dinamik metamorfizma etkisinde kaldığını gösteren dokulara sahiptir. Manto peridotitlerinin tüm kayaç MgO bileşimi, söz konusu kayaların tüketilme derecesini yansıtan bir veri olarak pek çok çalışmada kullanılmaktadır. Artan MgO içeriği kısmi ergime derecesinin (tüketilme) büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Ana oksit jeokimyası açısından değerlendirildiğinde, manto peridotitleri SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ve Fe_2O_3 gibi bazı ana oksit içeriklerinin MgO içeriklerine kıyaslandığı ikili değişim diyagramları tüm örneklerin ilksel üst manto modal bileşimine kıyasla farklı derecede tüketildiklerini göstermektedir (Şekil 5). Özellikle peridotitlerin artan MgO içeriklerine karşılık SiO_2 ve CaO içeriklerinde belirgin bir azalış görülürken Al_2O_3 içeriğinde hafif ve TiO_2 içeriklerinde ise belirgin bir korelasyon görülmemektedir (Şekil 5). Dolayısıyla söz konusu kayalar üst mantonun farklı derecelerde kısmi ergime süreçlerine maruz kalması ve ergiyik ayrılımindan sonra kalan kalıntı kayalar olduklarını göstermektedir.

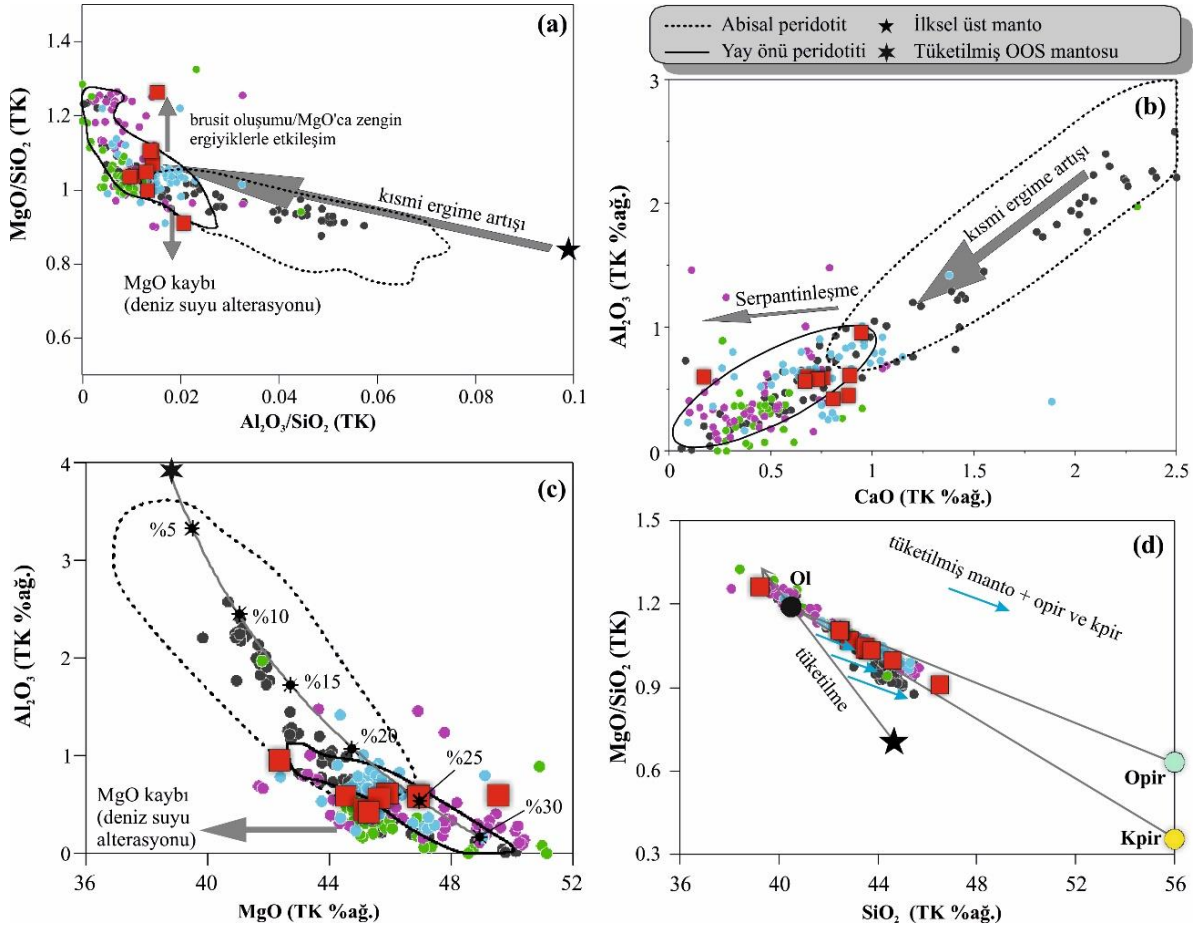
MgO/ SiO_2 - Al_2O_3 / SiO_2 içeriklerindeki değişimin gösterildiği diyagramda, Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitlerinin Snow & Dick (1995) tarafından tanımlanan kısmi ergime artışı yönsemesine benzer bir dağılım bulunduğu görülmektedir (Şekil 8a). Bir örneğin manto yönsemesi alanının üst kısmında kısmen yüksek MgO/ SiO_2 oranına sahip olması söz konusu kayadaki brusit minerali oluşumuyla ya da MgO içeriği zengin ergiyiklerle oluşan bir metazomatizmayla ilişkilendirilebilir. Petrografik incelemeler sonucu brusit mineraline rastlanılmamış olması ikinci senaryonun söz konusu örnek için geçerli olduğunu düşündürmektedir. Grafiğin alt kısmına yakın kısmında yer alan, AK miktarı % 1,8 olan bir örneğin (HA23) ise serpantinleşmeye nazaran deniz suyu alterasyonunun yol açtığı MgO kaybı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Niu, 2004; Hart & Zindler, 1986; Jagoutz vd., 1979). Genel olarak değerlendirildiğinde manto peridotitleri yay önü peridotitleri alanında yayılım sunmaktadır (Şekil 8a).

Manto peridotitlerinin klinopiroksen ve krom spinel modal bollukları, bu kayaçların CaO ve Al₂O₃ içeriklerini kontrol eden en önemli etmendir. Bu kalıntı kayaçların ilksel mantoya göre daha düşük CaO ve Al₂O₃ içermeleri, üst mantoda maruz kaldıkları farklı derecelerdeki kısmi ergime olaylarında bünyelerindeki klinopiroksen fazlarını oluşturan bileşenlerin ergiyiğe katılarak söz konusu kalıntı kayaçlardan uzaklaşması olayının bir sonucudur. CaO ve Al₂O₃ içeriklerinin incelendiği Şekil 8b’de, örneklerin çoğunlukla yay önü peridotitleri alanı ve yakın bölgesinde yayılım sundukları görülmektedir.

Abisal peridotitler, okyanus ortası sırtı (OOS) ortamında susuz ergime koşulları altında üst mantonun düşük derecede kısmi ergimesinden (%2-15) sonra kalan kalıntı manto kayaçları olarak tanımlanır. Yay önü peridotitleri ise daha önce bir miktar tükenmiş olan üst mantonun yitim zonu ortamında, sulu koşullar altında yeniden tüketilmesiyle oluşan yüksek kısmi ergime derecesine (>%20) sahip kalıntı manto kayaçlarıdır (Üner, 2020; Uysal vd., 2012; Jean vd., 2010; Aldanmaz vd., 2009; Pearce vd., 2000; Arai, 1994; Ishii vd., 1992). Tüm kayaç Al₂O₃-MgO değişim diyagramında, Kızıldağ manto peridotitlerinin ilksel üst mantoya kıyasla %20-28 civarında tüketilmiş üst manto ürünleri oldukları belirlenmiştir ve bu kayaçların yitim zonu ortamında oluşmuş yay önü peridotitleri olduğu bu diyagramla da doğrulanmıştır. Grafiğin sol tarafına yakın dağılım sunan örneklerin MgO tüketilmesi (olası deniz suyu alterasyonu) ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 8c).

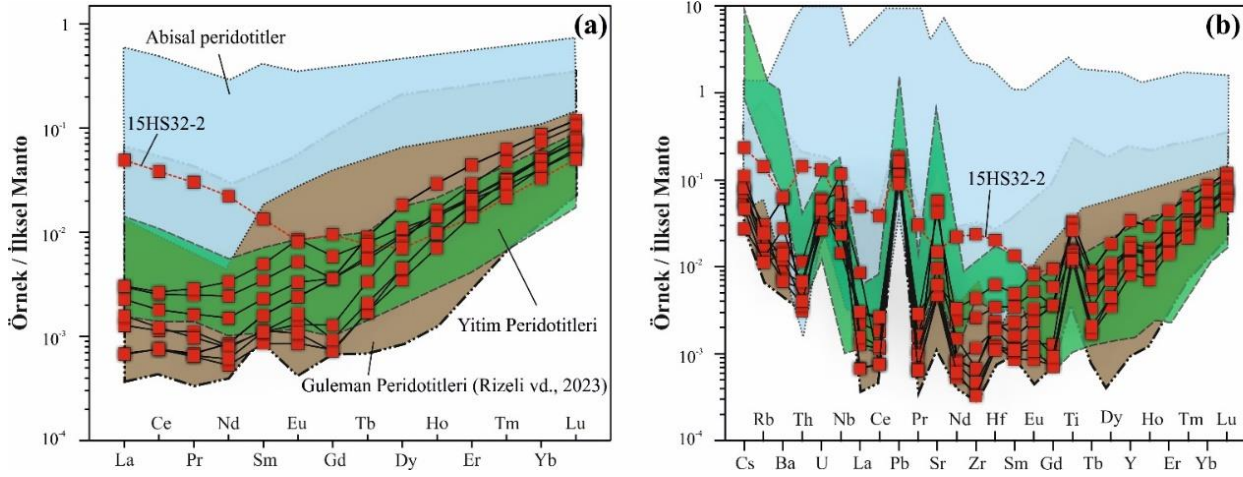
Ergiyik-kayaç etkileşiminin açıklanması için kullanılan MgO/SiO₂ - SiO₂ diyagramında (Şekil 8d), Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitleri genellikle ilksel üst manto bileşimi bölgesinden (siyah yıldız) olivin bileşimini temsil eden noktaya doğru dağılım sunması beklenmektedir. Fakat genellikle bu dağılım olivin-klinopiroksen, daha az oranda da olivin-ortopiroksen doğrusu üzerinde dağılım göstermektedir (Şekil 8d). Önceki çalışmalarda ergiyik-manto etkileşimi sonucu genel olarak olivin ve ortopiroksen arasında görülen dağılımın, kayaçların tüketilmiş karakterleriyle uyumlu olduğu belirtilmektedir (ör. Kelemen vd., 1992). Fakat bu genellemenin aksine Kızıldağ manto peridotitlerinin ağırlıklı olarak olivin-klinopiroksen doğrusu üzerinde/yakınında dağılım sunduğu görülmektedir. Söz konusu kayaçlara ait BSE görüntüleri incelendiğinde, bunun sebebinin özellikle ortopiroksen ile daha düşük oranda olivin minerallerinin arası ve sınırlarında ayrıca spinellere eşlik eden ikincil klinopiroksen minerallerinin varlığı olarak yorumlanabilir (Şekil 4g, h, i). Tüketilmiş karaktere sahip olan manto peridotitlerindeki söz konusu ikincil klinopiroksenlerin varlığı ergime olaylarının ardından gelişen ergiyik-kayaç metazomatizması süreçleriyle ilişkili olmalıdır.

Manto peridotitlerinin kısmi ergime derecelerinin belirlenmesi, kısmi ergime (tüketilme) olaylarından sonra bir ergiyik-kayaç etkileşiminin (metazomatizma süreçleri) olup olmadığının ve bu kayaçların hangi tektonik ortamda oluşmuş olabileceklerinin ortaya çıkartılmasında iz element çalışmaları oldukça önemli bir rehberdir (Niu, 2004; Pearce vd., 2000). Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitlerinin ilksel mantoya oranlanmış NTE ve bazı iz element içerik desenleri abisal peridotitler, yitim peridotitleri ve Guleman Ofiyoliti manto peridotitleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 9). Her iki diyagramda da açıkça görülebileceği üzere söz konusu kayaçlar genellikle yitim peridotitleri alanı ve yakınlarında dağılım sunmaktadır. Özellikle “15HS32-2” numaralı harzburjit örneğinin yüksek çekim alanlı elementlerden Th ve hafif NTE’leri La, Pr, Nd ve Sm içeriklerinde belirgin zenginleşmeler görülmektedir. Benzer şekilde söz konusu örneğin büyük iyon çaplı elementlerden Cs ve Rb elementlerinde de görülen bu zenginleşmeler (Şekil 9a), bir yitim zonu ortamında yiten levhadan ayrılan ergiyik ve/veya akışkanların manto kamasındaki ergime bölgesine taşınması ve bu bölgeyi metazomatizmaya uğratmasıyla ilgilidir. Bu metazomatizmanın izlerini belirgin pozitif Ti, Sr ve Pb anomalilerinin varlığı da kanıtlamaktadır (Şekil 9b).



Şekil 8. Kızıldağ Manto Peridotitlerinin Tüm Kayaç **a.** MgO/SiO₂ - Al₂O₃/SiO₂, **b.** Al₂O₃ - CaO, **c.** Al₂O₃ - MgO ve **d.** MgO/SiO₂ - SiO₂ Diyagramları. Abisal Peridotit Alanları ve Kısmi Ergime Oranları Niu vd. (1997)'nden, Yay Önü Peridotitleri Alanı Parkinson vd. (1998) ve Ishii (1992)'den, Kısmi Ergime Artışı Yönsemesi Snow & Dick (1995)'ten Alınmıştır. İlksel Üst Manto ve Tüketilmiş OOS Mantosu Bileşimi Sırasıyla Palme ve O'Neill (2014) ile Workman & Hart (2005)'dan Alınmıştır. Tüketilmiş OOS Mantosunun 10 kbar Basınç Koşullarında Farklı Derecelerdeki (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) Kısmi Ergimeler Sonucu Oluşan Kimyasal Bileşimi pMELTS ile Hesaplanmıştır (Ghiorso vd., 2002).

Sulu ergiyikler harzburjitlerin içinden kanallar yardımıyla geçerek yan kayaçtaki ortopiroksenin ergimesine ve dolayısıyla ilksel bileşimi harzburjit olan kayacın önemli ölçüde kısmi ergimeye uğraması sonucu kalıntı dunitlerin oluşmasına yol açmaktadır (Zhou vd., 2005). Bu kanalların büyüklüğüne bağlı olarak harzburjit/dunit oranı farklı boyutlarda gelişir. Sulu ergiyiklerin oluşup bu şekilde manto kamasını etkileyebileceği en muhtemel tektonik ortam yitim zonudur (Uysal vd., 2007). Sulu ergiyiklerin taşındığı piroksenit litolojisindeki bu kanallar kromitlerin oluşumunda oldukça önemli rol oynamaktadır (Proenza vd., 1999; Zhou ve Robinson, 1994). Önceki çalışmalarda Türkiye'de Ortaca bölgesinde (Uysal vd., 2007) ve Guleman Ofiyotiti manto peridotitlerinde görülen bu piroksenit kanalları (Rizeli vd., 2023) dünyada farklı ofiyolitlerde de rapor edilmiştir (ör. Dilek & Morishita, 2009; Varfalvy vd., 1996; Edwards, 1995; Orberger vd., 1995). Kökensel olarak boninitik ergiyiklerin manto kamasından ayrılması ve taşınmasıyla ilişkili damarlar olarak yorumlanan bu kanallar Arsuz-Çevlik arasında peridotitleri keser halde görülmektedir (Şekil 2e). Dolayısıyla ergiyik-kayaç etkileşimi olarak açıklanan bu durum söz konusu boninitik ergiyiklerin kanallar boyunca manto peridotitlerini metazomatizmaya uğrattığını desteklemektedir.

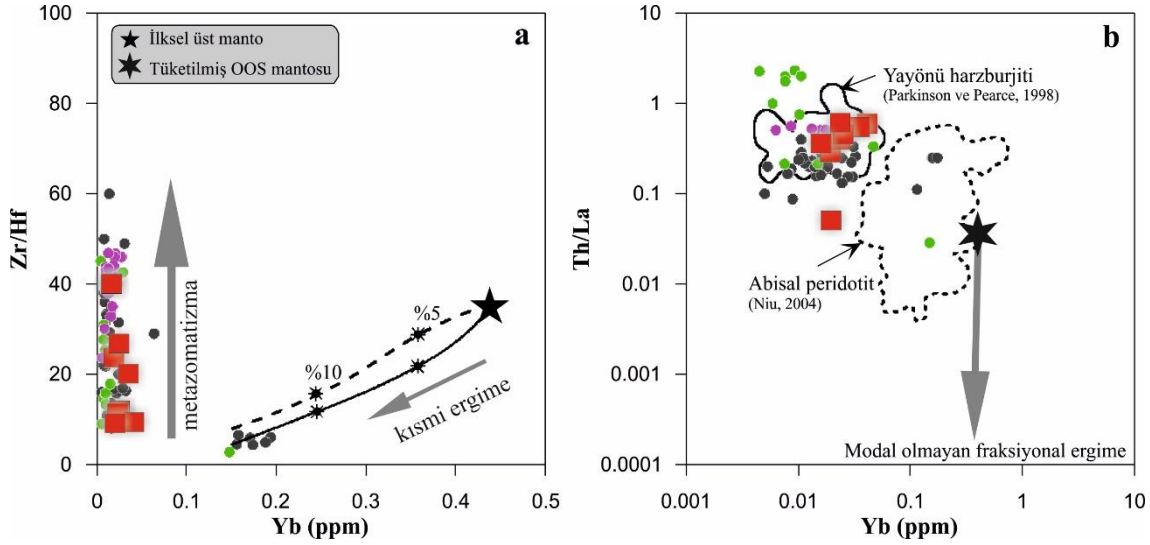


Şekil 9. Kızıldağ Ofiyoliti'ne Ait Manto Peridotitlerinin Palme & O'Neill (2014)'in İlkse Manto Değerlerine Oranlanan **a.** NTE ve **b.** Çoklu Element Dağılımlarının Abisal, Yitim ve Guleman Peridotitleri ile Karşılaştırılması. Abisal Peridotit Alanı Hellebrand vd. (2002), Johnson & Dick (1992) ve Niu vd. (1997) 'nden; Yitim Peridotitleri Alanı Parkinson & Pearce (1998)'ten; Guleman Peridotitleri Alanı ise Rizeli vd. (2016, 2023) ve Lin vd. (2020)'nden Alınmıştır.

Simplektit tanımı metamorfik ve magmatik kayalarda görülen, farklı mineral fazlarının karmaşık vermiküler (kurtçuk şekilli; *worm-like*) iç içe büyümeleridir (Vernon, 2004). Manto simplektitlerinin oluşumu için önerilen en genel kabul, ergiyik-kayaç etkileşimleri ve ergiyikten mineral fazlarının çökmesi olayıdır (ör. Godard vd., 2008; Suhr vd., 2008; Seyler vd., 2007). Benzer yapılar, Orta Atlantik Sırtı peridotitlerinde de tanımlanmıştır ve bunların varlığı, OOS tipi veya alkalin ergiyiklerin yan kayaçla etkileşimine atfedilir ve bu da spinel-ortopiroksen-klinopiroksen iç içe büyümelerinin çok fazlı çökmesine neden olur (Suhr vd., 2008; Seyler vd., 2007). Kızıldağ manto peridotitlerinde olivinin spinellerde kapanım şeklinde bulunması (Şekil 4i), kurtçuk şekilli (*worm-like*) klinopiroksen-ortopiroksen-spinel simplektitlerin varlığı (Şekil 4h, i) dokusal özellikler, söz konusu kayalardaki ergiyik-kayaç metazomatizmasının tipik bir kanıtıdır (Bédard vd., 2009; Dilek & Morishita, 2009; Hellebrand vd., 2002).

Kalıntı peridotitlerde klinopiroksenlerin bolluğuyla kontrol edilen Zr/Hf değeri (Hart & Dunn, 1993) söz konusu kayaların artan tüketilme oranıyla azalması beklenir. Kızıldağ peridotitlerinin belirgin bir Zr/Hf-Yb dağılımının olmaması mantodaki kısmi ergimelerden sonra gelişen metazomatizmanın bir sonucu olarak yorumlanmaktadır (Takazawa vd., 2000; Şekil 10a).

Yitim zonu magmatizması için peridotitlerin solidüsünü düşürmek için hemen hemen her zaman sulu akışkan fazlar gereklidir (Grove vd., 2012; Shervais & Jean, 2012). Aslında Kızıldağ peridotitlerindeki yüksek Pb içeriği (dolayısıyla daha düşük Ce/Pb oranları) sulu fazların ilavesinden kaynaklanabilir (Şekil 9b). Söz konusu akışkan fazlarla birlikte silikat ergiyikler de manto kamasını metazomatize etmiş olabilir. Kızıldağ manto peridotitlerinde gözlemlenen petrografik ve jeokimyasal özelliklere göre bu sulu akışkan fazlar tek başına etkin olduğunu söylemek yeterli değildir. Kızıldağ peridotitlerinin iz element jeokimyasında (Şekil 9b) yüksek uyumsuzluğa sahip elementlerin önemli derecede zenginleşmesi nedeniyle metazomatizma süreçlerinde silikat ergiyiklerin etkisi sulu akışkanlara kıyasla tercih edilmelidir. Yüksek derecede uyumsuz elementler ergiyiklerde daha fazla zenginleşirken, sulu akışkan fazlar belirli koşullar altında daha yüksek çözünürlüğe sahip akışkan-hareketli (*fluid-mobile*) elementleri harekete geçirme ve zenginleştirme eğilimindedir. Şekil 10b'de, Kızıldağ peridotitlerinin ya yönü harzburjileri alanında yüksek Th/La oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum peridotitlerin tüketilmiş doğasına aykırı görülmekte, yüksek Th/La oranına sahip bir ergiyiğin sisteme olduğu (metazomatizmaya uğrattığı) anlamına gelmektedir. "Th" genellikle bir yitimle ilişkilendirilir ve OOS bazaltlarıyla karşılaştırıldığında genellikle yay ile ilişkili magmalarda yüksektir (Pearce, 2008). Ayrıca yay magmatizmasında, yiten sedimanların etkisiyle yüksek Th/Nb ve Th/La değerlerine sahip olduğu da rapor edilmiştir (Plank, 2005). Bu nedenle, Kızıldağ peridotitlerinin, sulu sedimanlardan kaynaklı ergiyiklerin de dâhil olduğu bir metazomatizmaya maruz kalmış olması mümkündür. Yitim başlangıcı (*subduction intiation: SI*) magmatizması sırasında sediman ergimelerinin varlığını öne süren son çalışmalar da bu durumu destekler niteliktedir (Kusano vd., 2017; Haase vd., 2015).



Şekil 10. Kızıldağ Manto Peridotitlerinin a. Zr/Hf ve b. Th/La Oranlarının Yb İçeriğine Göre Değişim Grafikleri

SONUÇLAR

GD Anadolu Ofiyolit Kuşağı'nda bulunan Kızıldağ (Hatay) Ofiyoliti manto peridotitlerinin materyal olarak kullanıldığı bu çalışmada petrografik ve tüm kayaç jeokimyası yorumlanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitlerinde ikincil klinopiroksenin varlığı, olivinin spinel içindeki kapanımları ve özellikle kurtçuk şekilli (*worm-like*) piroksen-spinel birliktelikleri bu kayaçların oluşumunda gerçekleşen ergiyik kayaç etkileşiminin (metazomatizmanın) petrografik bir kanıtıdır. Ayrıca özellikle saha gözlemlerinde harzburjitleri kesen ortopiroksen damarlarının varlığı bir yitim zonu ortamını işaret etmesi yanı sıra ergiyiklerin (boninitik) yan kayacını metazomatizmaya uğratarak taşındığı kanallar olarak yorumlanmıştır. Esas olarak harzburjit ve az oranda dünitten ibaret olan manto peridotitlerinin bazı ana oksit (CaO , Al_2O_3 ve TiO_2) içeriklerinin önemli ölçüde düşük bollukta olması tüketilmiş doğalarıyla uyumludur. Hem ana oksit hem de ilksel mantoya normalize edilmiş iz ve NTE değerleri söz konusu peridotitlerin %20 ilâ %28 arasında bir kısmi ergimeye (tüketilmeye) maruz kalan yay önu ortamda oluşmuş kalıntı kayaçlar olduğunu göstermektedir. Bazı örneklerde görülen U şekilli NTE desenleri, Cs, Rb zenginleşmeleri, pozitif Ti, Sr ve Pb desenleri bu uyumsuz elementlerce zengin ergiyik ve/veya akışkanların söz konusu kalıntı kayaçlarla oluşturduğu metazomatizmanın bir sonucudur. Yüksek Zr/Hf - Yb ve Th/La - Yb içerikleri de tüketilmiş karakterdeki peridotitlerin metazomatizma süreçlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Metazomatizma sonucunda sulu akışkanlar, boninitik ergiyikler ve yiten levhadaki sulu sedimanların ergimesi sonucu oluşan ergiyiklerin söz konusu metazomatizmada rol oynadığı düşünülmektedir. Özetle Kızıldağ manto peridotitleri, %20 ilâ %28 oranında kısmi ergimeye maruz kalan kalıntı kayaçlar olup yitim zonu tektonik ortamında oluşmuş ve yitim zonu ortamını karakterize eden metazomatizma kanıtları gösteren yay önu peridotitleridir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 117Y303 numaralı 1002-Hızlı Destek Projesi ile maddi olarak desteklenmiştir. Saha çalışmalarındaki desteklerinden ötürü arkadaşım rahmetli Furkan CANSIZ'a minnettarım. Tüm kayaç iz ve NTE analizleri 2017 yılında Yer Bilimleri Enstitüsü, Sinica Akademisi, Tayvan'da gerçekleştirilmiştir. Analizlerin ücretsiz olarak yapılması için laboratuvarlarına bizleri davet eden Sun-Lin CHUNG'a ve oldukça düşük deteksiyon limitlerinde iz ve NTE analizlerinin yapılmasında büyük katkısı olan Fu-Lung LIN'e teşekkür ederiz. Bu çalışma Mustafa Eren RİZELİ'nin doktora tezinin bir parçasından niteliğindedir.

KAYNAKLAR

Aldanmaz, E., van Hinsbergen, D. J. J., Yıldız-Yüksekol, Ö., Schmidt, M. W., McPhee, P. J., Meisel, T., Güçtekin, A., Mason, P. R. D. (2020). Effects of reactive dissolution of orthopyroxene in producing incompatible element depleted melts and refractory mantle residues during early fore-arc spreading: constraints from ophiolites in eastern Mediterranean. *Lithos*, 360–361, 105438. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105438>

Aldanmaz, E., Schmidt, M. W., Gourgaud, A., & Meisel, T. (2009). Mid-ocean ridge and supra-subduction geochemical signatures in spinel–peridotites from the Neotethyan ophiolites in SW Turkey: Implications for upper mantle melting processes. *Lithos*, 113(3–4), 691–708.

<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.010><https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.010>

Allen, D.E., ve Seyfried, W.E. (2005). REE controls in ultramafic hosted MOR hydrothermal systems: An experimental study at elevated temperature and pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 675–683. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.016>

Arai, S. (1994). Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. *Chemical Geology*, 113(3), 191–204. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90066-3)

Bağcı, U., Parlak, O., & Höck, V. (2008). Geochemistry and tectonic environment of diverse magma generations forming the crustal units of the Kızıldağ (Hatay) Ophiolite, southern Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(1), 43–71.

Bağcı, U., Parlak, O., & Höck, V. (2005). Whole-rock and mineral chemistry of cumulates from the Kızıldağ (Hatay) ophiolite (Turkey): clues for multiple magma generation during crustal accretion in the southern Neotethyan ocean. *Mineralogical Magazine*, 69(1), 53–76. <https://doi.org/10.1180/0026461056910234>

Bédard, É., Hébert, R., Guilmette, C., Lesage, G., Wang, C.S., Dostal, J. (2009). Petrology and geochemistry of the Saga and Sangsang ophiolitic massifs, Yarlung Zangbo Suture Zone, Southern Tibet: evidence for an arc–back-arc origin. *Lithos* 113,48–67.

Bingöl, A. F., Beyarslan, M., Lin, Y.-C., & Lee, H.-Y. (2018). Geochronological and geochemical constraints on the origin of the Southeast Anatolian ophiolites, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 569(11), 1–40. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3880-0>

Birck, J.L., Barman, M.R. ve Capmas, F. (1997). Re-Os isotopic measurements at the femtomole level in natural samples, . *Geostand Newsletter*, cilt 21, ss. 19-27. doi.org/10.1111/j.1751-908X.1997.tb00528.x

Birner, S.K., Warren, J.M., Cottrell, E., Davis, F.A., Kelley, F.A., Fallon, T.J. (2017). Forearc peridotites from Tonga record heterogeneous oxidation of the mantle following subduction initiation. *J. Petrol.* 58, 1755–1780.

Chen, C., Su, B.-X., Xiao, Y., Uysal, İ., Lin, W., Chu, Y., Jing, J.-J., Sakyi, P. A. (2020). Highly siderophile elements and Os isotope constraints on the genesis of peridotites from the Kızıldağ ophiolite, southern Turkey. *Lithos*, 368–369, 105583. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105583>

Cohen, A.S. ve Waters, F.G. (1996). Separation of osmium from geological materials by solvent extraction for analysis by thermal ionisation mass spectrometry, *Anal. Chim. Acta*, cilt 332, ss. 269-275. [doi.org/10.1016/0003-2670\(96\)00226-7](https://doi.org/10.1016/0003-2670(96)00226-7)

Creaser, R.A., Papanastassiou, D.A. ve Wasserburg, G.J. (1991). Negative thermal ion mass spectrometry of osmium, rhenium, and iridium, *Geochim. Cosmochim. Acta*, cilt 55, ss. 397-401. [doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90427-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90427-7)

Dick, H.J.B., Bullen, T. (1984). Chromium spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and Alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 86, 54–76.

Dilek, Y., & Furnes, H. (2009). Structure and geochemistry of Tethyan ophiolites and their petrogenesis in subduction rollback systems. *Lithos*, 113(1–2), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.022>

Dilek, Y., & Morishita, T. (2009). Melt migration and upper mantle evolution during incipient arc construction: Jurassic Eastern Mirdita ophiolite, Albania. *Island Arc* 18(4), 551–554. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2009.00692.x>

Dilek, Y., and Thy, P. (2009). Island arc tholeiite to boninitic melt evolution of the Cretaceous Kızıldağ (Turkey) ophiolite: Model for multi-stage early arc-forearc magmatism in Tethyan subduction factories. *Lithos*, 113(1–2), 68–87. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.05.044>

Dilek, Y. (2006). Collision tectonics of the Mediterranean region: Causes and consequences. *Special Paper of the Geological Society of America*, 409(May), 1–13. [https://doi.org/10.1130/2006.2409\(01\)](https://doi.org/10.1130/2006.2409(01))

- Dilek, Y., and Flower, M. F. J. (2003). Arc-trench rollback and forearc accretion: 2. A model template for ophiolites in Albania, Cyprus, and Oman. *Geological Society, London, Special Publications*, 218(1), 43–68. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.218.01.04>
- Dilek, Y. and Thy, P. (1998). Structure, petrology and seafloor spreading tectonics of the Kızıldağ ophiolite, Turkey, edited by R.A. Mills, K. Harrison (Ed.), *Modern Ocean Floor Processes and the Geological Record*, London, Geological Society, *London, Special Publications*, 148, 43–69. doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.148.01.04
- Edwards, S. J. (1995). Boninitic and tholeiitic dykes in the Lewis Hills mantle section of the Bay of Islands ophiolite: implications for magmatism adjacent to a fracture zone in a backarc spreading environment. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32(12), 2128–2146. <https://doi.org/10.1139/e95-166>
- Eggins, S. M., Woodhead, J. D., Kinsley, L. P. J., Mortimer, G. E., Sylvester, P., McCulloch, M. T., Hergt, J. M., Handler, M. R. (1997). A simple method for the precise determination of ≥ 40 trace elements in geological samples by ICPMS using enriched isotope internal standardisation. *Chemical Geology*, 134(4), 311–326. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00100-3](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00100-3)
- Elderfield, H., and Greaves, M.J. (1982) The rare earth elements in seawater. *Nature* 296, 214–219. <https://doi.org/10.1038/296214a0>.
- Erendil, M. (1984). Petrology and structures of the upper crustal units of the Kızıldağ ophiolite, O. Tekeli, M.C. Göncüoğlu (Ed.), *Proceedings of International Symposium on the Geology of the Tauride Belt, Mineral Research and Exploration Institute (MTA) of Turkey Publications* (pp. 269–284). Ankara.
- Feng, G., Yang, J., Niu, X., Liu, F., Qiu, T., Dilek, Y. (2021). Formation processes and tectonic implications of mantle peridotites of the Yushigou ophiolite in the North Qilian Orogenic Belt, NW China. *Lithos*, 400–401(July), 106430. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106430>
- Frisby, C., Bizimis, M., and Mallick, S. (2016). Seawater-derived rare earth element addition to abyssal peridotites during serpentinization. *Lithos* 248–251, 432–454. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.01.025>
- Furnes, H., and Safonova, I. (2019). Ophiolites of the Central Asian Orogenic Belt: Geochemical and petrological characterization and tectonic settings. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1255–1284. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.007>
- Ghiorso, M.S., Hirschmann, M.M., Reiners, P.W., Kress, V.C. (2002). The pMELTS: a re- vision of MELTS aimed at improving calculation of phase relations and major element partitioning involved in partial melting of the mantle at pressures up to 3 GPa. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 3.
- Godard M., Lagabrielle Y., Alard O. Harvey J., 2008. Geo- chemistry of the highly depleted peridotites drilled at ODP Sites 1272 and 1274 (Fifteen-Twenty Fracture Zone, Mid-Atlantic Ridge): Implications for mantle dynamics beneath a slow spreading ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 267: 410-425.
- Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., Afonso, J. C., Begg, G. C. (2009). The composition and evolution of lithospheric mantle: A re-evaluation and its tectonic implications. *Journal of Petrology*, 50(7), 1185–1204. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn033>
- Grove, T.L., Till, C.B., and Krawczynski, M.J. (2012). The role of H₂O in subduction zone magmatism. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 40, 413–439. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105310>.
- Haase, K.M., Freund, S., Koepke, J., Hauff, F., Erdmann, M. (2015). Melts of sediments in the mantle wedge of the Oman ophiolite. *Geology* 43, 275–278. <https://doi.org/10.1130/G36451.1>.
- Hart, S. R., and Dnnn, T. (1993). Experimental cpx/melt partitioning of 24 trace elements. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113, 1–8. <https://doi.org/10.1007/BF00320827>
- Hart, S. R., and Zindler, A. (1986). In search of a bulk-Earth composition. *Chemical Geology*, 57(3–4), 247–267. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90053-7](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90053-7)
- Hellebrand, E., Snow, J. E., Hoppe, P., Hofmann, A. W. (2002). Garnet-field melting and late-stage refertilization in “residual” abyssal peridotites from the Central Indian Ridge. *Journal of Petrology*, 43(12), 2305–2338. <https://doi.org/10.1093/petrology/43.12.2305>
- Iizuka, Y., Bellwood, P., Hung, H.C., Dizon, E.Z. (2005). A non-destructive mineralogical study of nephritic artifacts from Itbayat Island, Batanes, Northern Philippines, *Journal of Austronesian Studies*, cilt 1(1), ss. 80-105

- Inwood, J., Morris, A., Anderson, M. W., Robertson, A. H. F. (2009). Neotethyan intraoceanic microplate rotation and variations in spreading axis orientation: Palaeomagnetic evidence from the Hatay ophiolite (southern Turkey). *Earth and Planetary Science Letters*, 280(1–4), 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.01.021>
- Ishii, T., Robinson, P. T., Maekawa, H., Fiske, R. (1992). Petrological Studies of Peridotites from Diapiric Serpentine Seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana Forearc, Leg 125. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, 125 Scientific Results*. Ocean Drilling Program. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.125.129.1992>
- Jagoutz, E., Palme, H., Baddenhausen, H., Blum, K., Cendales, M., Dreibus, G., Spettel, B., Lorenz, V. Vanke, H. (1979). The abundance of major, minor and trace elements in the earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 11, 2031–2050.
- Jean, M. M., Shervais, J. W., Choi, S.-H., Mukasa, S. B. (2010). Melt extraction and melt refertilization in mantle peridotite of the Coast Range ophiolite: an LA-ICP-MS study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159(1), 113–136. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0419-0>
- Jochum, K.P., Weis, U., Schwager, B., Stoll, B., Wilson, S.A., Haug, G.H., Andreae, M.O., Enzweiler, J. (2016). Reference values following ISO guidelines for frequently requested rock reference materials. *Geostand. Geoanal. Res.* 40, 333–350. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2015.00392.x>
- Johnson, C.M. and Beard, B.L. (1999). Correction of instrumentally produced mass fractionation during isotopic analysis of Fe by thermal ionization mass spectrometry, *Inter J Mass Spectrom* 193, 87–99. [doi.org/10.1016/S1387-3806\(99\)00158-X](https://doi.org/10.1016/S1387-3806(99)00158-X)
- Johnson K. T. M. and Dick H. J. B. (1992) Open-system melting and temporal and spatial variation of peridotite and basalts at the Atlantis II Fracture Zone. *J. Geophys. Res.* 97, 9219–9241.
- Karaoğlan, F., Parlak, O., Klötzli, U., Thöni, M., Koller, F. (2013). U-Pb and Sm-Nd geochronology of the Kızıldağ (Hatay, Turkey) ophiolite: Implications for the timing and duration of suprasubduction zone type oceanic crust formation in the southern Neotethys. *Geological Magazine*, 150(2), 283–299. <https://doi.org/10.1017/S0016756812000477>
- Kelemen, P.B., Hirth, G., Shimizu, N., Spiegelman, M., Dick, H.J.B., 1997. A review of melt migration processes in the adiabatically upwelling mantle beneath oceanic spreading ridges. *Philos. Trans. R. Soc. London, A* 355 (1723), 283–318.
- Kelemen, P. B., Dick, H. J. B., and Quick, J. E. (1992). Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle. *Nature*, 358(6388), 635–641. <https://doi.org/10.1038/358635a0>
- Kusano, Y., Umino, S., Shinjo, R., Ikei, A., Adachi, Y., Miyashita, S., Arai, S. (2017). Contribution of slab-derived fluid and sedimentary melt in the incipient arc magmas with development of the paleo-arc in the Oman Ophiolite. *Chem. Geol.* 449, 206–225. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.012>
- Kusky, T. M., Windley, B. F., Safonova, I., Wakita, K., Wakabayashi, J., Polat, A., Santosh, M. (2013). Recognition of ocean plate stratigraphy in accretionary orogens through Earth history: A record of 3.8 billion years of sea floor spreading, subduction, and accretion. *Gondwana Research*, 24(2), 501–547. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.01.004>
- Lin, K. Y., Wang, K. L., Chung, S. L., Bingöl, A. F., Iizuka, Y., Lee, H. Y. (2020). Tracking the magmatic response to subduction initiation in the forearc mantle wedge: Insights from peridotite geochemistry of the Guleman and Kızıldağ ophiolites, Southeastern Turkey. *Lithos*, 376–377, 105737. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105737>
- Maruyama, S., Liou, J. G., and Terabayashi, M. (1996). Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. *International Geology Review*, 38(6), 485–594. <https://doi.org/10.1080/00206819709465347>
- Mercier, J.-C. C and Nicolas, A. (1975). Textures and fabrics of upper-mantle peridotites as illustrated by xenoliths from basalts. *Journal of Petrology*, 16(2), 454–487. <https://doi.org/10.1093/petrology/16.2.454>
- MTA. (2002). *1/500000 Türkiye Jeoloji Haritası (M. Genel)*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara
- Niu, Y. (2004). Bulk-rock major and trace element compositions of abyssal peridotites: Implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath Mid-Ocean ridges. *Journal of Petrology*, 45(12), 2423–2458. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh068>
- Niu, Y. (1997). Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges: Evidence from abyssal peridotites. *Journal of Petrology*, 38(8), 1047–1074. <https://doi.org/10.1093/ptroj/38.8.1047>

- Orberger, B., Lorandb, J. P., Girardeau, J., Merciera, J. C. C., Pitragool, S. (1995). Petrogenesis of ultramafic rocks and associated chromitites in the Nan Uttaradit ophiolite, Northern Thailand. *Lithos* 35, 153–182.
- Pagé, P., Bédard, J.H., and Tremblay, A. (2009). Geochemical variations in a depleted fore-arc mantle: The Ordovician Thetford Mines ophiolite. *Lithos*, 113, 21–47, doi:10.1016/j.lithos.2009.03.030.
- Palme, H., and O'Neill, H. S. C. (2014). Cosmochemical Estimates of Mantle Composition. *Treatise on Geochemistry*, 1–39. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00201-1>
- Parkinson, I. J., and Pearce, J. A. (1998). Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana Forearc (ODP Leg 125): Evidence for Mantle Melting and Melt-Mantle Interaction in a Supra-Subduction Zone Setting. *Journal of Petrology*, 39(9), 1577–1618. <https://doi.org/10.1093/petroj/39.9.1577>
- Parlak, O., Rızaoğlu, T., Bağcı, U., Karaoğlan, F., Höck, V. (2009). Tectonic significance of the geochemistry and petrology of ophiolites in southeast Anatolia, Turkey. *Tectonophysics*, 473(1–2), 173–187. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.08.002>
- Pearce, J. A., and Robinson, P. T. (2010). The Troodos ophiolitic complex probably formed in a subduction initiation, slab edge setting. *Gondwana Research* 18(1), 60–81. <https://doi.org/10.1016/J.GR.2009.12.003>
- Pearce, J. A., Barker, P. F., Edwards, S. J., Parkinson, I. J., Leat, P. T. (2000). Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(1), 36–53. <https://doi.org/10.1007/s004100050572>
- Pearce, J. A., van der Laan, S. R., Arculus, R. J., Murton, B. J., Ishii, T., Peate, D. W., Parkinson, I. J. (1992). Boninite and harzburgite from leg 125 (Bonin-Mariana Forearc): a case study of magma genesis during the initial stages of subduction. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, 125 Scientific Results*. Ocean Drilling Program. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.125.172.1992>
- Pearce, J.A. (2008). Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos* 100, 14–48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Pişkin, O.E., Delaloye, M., Moritz, R., Wagner, J.J. (1990). Geochemistry and geothermometry of the Hatay complex Turkey: implication for genesis of the ophiolite sequence. Pp. 329-337 in: Proceedings of Troodos Ophiolite Symposium (J. Malpas, E. Moores, A. Panayiotou and C. Xenophontos, editors). Geological Survey, Cyprus.
- Plank, T. (2005). Constraints from Thorium/Lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents. *J. Petrol.* 46, 921–944. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi005>.
- Proenza, J., Gervilla, F., Melgarejo, J. C., Bodinier, J. L. (1999). Al- and Cr-rich chromitites from the Mayari-Baracoa ophiolitic belt (Eastern Cuba): Consequence of interaction between volatile-rich melts and peridotites in suprasubduction mantle. *Economic Geology*, 94(4), 547–566. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.4.547>
- Rizeli, M. E. (2020). *GD Anadolu Orojenik Kuşağı ofiyolitlerinin manto peridotitleri bileşimleri ve petrolojisi: ana elementi, iz element jeokimyası, mineral kimyası ve Fe, Mg ve Os izotopları*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Rizeli, M. E., Bingöl, A. F., Wang, K., Lee, H. (2023). Abyssal and forearc features of mantle peridotites in the Guleman ophiolite in SE Turkey. *Lithos*, 436–437, 106958. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106958>
- Rizeli, M. E., Beyarslan, M., Wang, K.-L., Bingöl, A. F. (2016). Mineral chemistry and petrology of mantle peridotites from the Guleman ophiolite (SE Anatolia, Turkey): Evidence of a forearc setting. *Journal of African Earth Sciences*, 123, 392–402. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.08.013>
- Saccani, E., Dilek, Y., Marroni, M., Pandolfi, L. (2015) Continental margin ophiolites of neotethys: Remnants of ancient Ocean–Continent Transition Zone (OCTZ) lithosphere and their geochemistry, mantle sources and melt evolution patterns. *Episodes*, 38, 230–249, doi: 10.18814/epiugs/2015/v38i4/82418.
- Saka, S., Uysal, I., Kapsiotis, A., Bağcı, U., Ersoy, E. Y., Su, B.-X., Seitz, H.-M., Hegner, E. (2019). Petrological characteristics and geochemical compositions of the Neotethyan Mersin ophiolite (southern Turkey): Processes of melt depletion, refertilization, chromitite formation and oceanic crust generation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 176, 281–299. <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2019.01.003>

- Saka, S., Uysal, I., Akmaz, R. M., Kaliwoda, M., Hochleitner, R. (2014). The effects of partial melting, melt-mantle interaction and fractionation on ophiolite generation: Constraints from the late Cretaceous Pozanti-Karsanti ophiolite, southern Turkey. *Lithos*, 202–203, 300–316. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.027>
- Selçuk, H. (1981). *Étude géologique de la partie méridionale du Hatay (Turquie)*. Thèse de doctorat, Université de Genève, Switzerland
- Seyler M., Lorand J.-P., Dick H.J.B. Drouin M. (2007). Pervasive melt percolation reactions in ultra-depleted refractory harzburgites at the Mid-Atlantic Ridge, 15° 20'N: ODP Hole1274A. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 153: 303-319.
- Shirey, S.B. and Walker, R.J. (1995). Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analyses, . *Anal. Chim. Acta*, cilt 67, ss. 2136-2141
- Snow, J. E., and Dick, H. J. B. (1995). Pervasive magnesium loss by marine weathering of peridotite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(20), 4219–4235. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00239-V](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00239-V)
- Stern, R.J., Reagan, M., Ishizuka, O., Ohara, Y., Whattam, S. (2012). To understand subduction initiation, study forearc crust: to understand forearc crust, study ophiolites. *Lithosphere* 4, 469–483
- Suhr, G., Kelemen, P., and Paulick, H. (2008). Microstructures in Hole 1274A peridotites, ODP Leg 209, Mid-Atlantic Ridge: Tracking the fate of melts percolating in peridotite as the lithosphere is intercepted. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9 (Q03012), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2007GC001726>
- Takazawa, E., Frey, F. A., Shimizu, N., Obata, M. (2000). Whole rock compositional variations in an upper mantle peridotite (Horoman, Hokkaido, Japan): Are they consistent with a partial melting process? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(4), 695–716. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00346-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00346-4)
- Tekeli, O., and Erendil, M., 1986. Geology and Petrology of the Kızıldağ Ophiolite (Hatay). *Maden Tetk. ve Aram. Derg.* 107, 21–37.
- Tekeli, O., Aksay, A., Urgan, B. M., Işık, A. (1983). Geology of the Aladağ Mountains. In Proceedings of International Symposium on the Geology of the Taurus Belt (eds O. Tekeli & M. C. Göncüoğlu), pp. 143–58. MTA-Ankara, Turkey.
- Tinkler, C., Wagner, J.J., Delaloye, M., Selçuk, H. (1981). Tectonic history of the Hatay ophiolites (south Turkey) and their interpretation with the Dead Sea rift. *Tectonophysics*, 72, 23–41. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90085-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90085-8)
- Üner, T. (2020). Multi-stage evolution of forearc mantle peridotites of Kağızman Ophiolite (Ağrı-eastern Anatolia). *Journal of African Earth Sciences*, 161(April 2019), 103667. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103667>
- Uysal, İ., Ersoy, E. Y., Karşı, O., Dilek, Y., Sadıklar, M. B., Ottley, C. J., Tiepolo, M., & Meisel, T. (2012). Coexistence of abyssal and ultra-depleted SSZ type mantle peridotites in a Neo-Tethyan Ophiolite in SW Turkey: Constraints from mineral composition, whole-rock geochemistry (major–trace–REE–PGE), and Re–Os isotope systematics. *Lithos*, 132–133, 50–69. <https://doi.org/10.1016/J.LITHOS.2011.11.009>
- Uysal, İ., Kaliwoda, M., Karşı, O., Tarkian, M., Sadıklar, M.B., Ottley, C.J. (2007). Compositional variations as a result of partial melting and melteperidotite interaction in an upper mantle section from the Ortaca area, southwestern Turkey. *Can. Mineral.* 45, 1471-1493.
- van Hinsbergen, D.J.J, Peters, K., Maffione, M., Spakman, W., Guilmette, C., Thieulot, C., Plümpner, O., Gürer, D., Brouwer, F.M., Aldanmaz, E., Kaymakci, N. (2015) Dynamics of intraoceanic subduction initiation: 2. Suprasubduction zone ophiolite formation and metamorphic sole exhumation in context of absolute plate motions. *Geochem Geophys Geosyst* 16:1771–1785
- Varfalvy, V., Hébert, R., Bedard, J. H., Laflèche, M. R. (1997). Petrology and geochemistry of pyroxenite dykes in upper mantle peridotites of the North Arm Mountain massif, Bay of Islands Ophiolite, Newfoundland: Implications for the genesis of boninitic and related magmas. *Canadian Mineralogist*, 35(2), 543–570. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00140-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00140-9)
- Vernon R.H. (2004). *A practical guide to rock microstructure*. Cambridge Univ. Press, 606 pp.
- Völkening, J., Walczyk, T. and Heumann, K.G. (1991). Osmium isotope ratio determinations by negative thermal ionization mass spectrometry, *Int. J. Mass Spectrom. Ion Process.* cilt 105, ss. 147-159

- Workman, R. K., and Hart, S. R. (2005). Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). *Earth and Planetary Science Letters*, 231(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.12.005>
- Xiong, F., Yang, J., Robinson, P. T., Xu, X., Liu, Z., Zhou, W., Feng, G., Xu, J., Li, J., Niu, X. (2017). High-Al and high-Cr podiform chromitites from the western Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet: Implications from mineralogy and geochemistry of chromian spinel, and platinum-group elements. *Ore Geology Reviews*, 80, 1020–1041. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.009>
- Zhou, M.-F, Robinson, P.T., Malpas, J., Edwards, S.J., Qi, L. (2005): REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet. *J. Petrol.* 46, 615–639.
- Zhou, M. -F., Robinson, P. T., Malpas, J., Li, Z. (1996). Podiform chromitites in the Luobusa ophiolite (Southern Tibet): Implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle. *Journal of Petrology*, 37(1), 3–21. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.1.3>