

Yemişliçay Formasyonu içindeki (sub)volkanik birimlerin $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ jeokronolojisi, mineral- ve tüm-kayaç jeokimyası, Sinop Güneyi (Orta Pontidler)

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, mineral- and whole-rock geochemistry of the (sub)volcanic units in the Yemişliçay Formation, South of Sinop (Central Pontides)

Kürşad ASAN^{1*}, Hüseyin KURT²

^{1,2}Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye.
kasan@ktun.edu.tr, hkurt@ktun.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 08.02.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 08.04.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 04.04.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.93798
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Orta Pontidlerde, Sinop-Samsun çevresinde Geç Kretase-Eosen yaşlı volkanik kayalar belirgin yüzlemler vermektedir. Geç Kretase volkanitleri, kuzeyde Sinop yakın civarında Hamsaros Volkanitleri, güneyde ise Alaçam-Dikmen-Durağan çevrelerinde Yemişliçay Formasyonu içindeki volkanik birimler ile temsil edilmektedir. Eosen volkanitleri, Bafra'dan başlayıp doğuya doğru geniş bir alanda yüzeyleyen Tekkeköy Formasyonu volkanitleri ile temsil edilir. Bu çalışmada, Yemişliçay Formasyonu içindeki (sub)volkanik birimlerin $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ jeokronolojisi, mineral- ve tüm-kayaç jeokimyası sunulacaktır. Yemişliçay Formasyonu volkanitleri plajiyoklas (An_{50-70}), klinopiroksen (ojit-diyopsit), amfibol (magnezyo-hastingsit, nadiren çermakit) fenokristalleri ve opak mineraller içermektedir. Volkanitlerden elde edilen $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ yaşları, volkanik faaliyetin Geç Kretase (~71 Myl, ters izokron yaşı) ve Eosen (~48 Myl, plato yaşı) olmak üzere iki ayrı dönemde etkili olduğunu göstermektedir. Geç Kretase volkanitlerinin Yemişliçay Formasyonu ile eş yaşlı bir volkanizmanın ürünü olduğu düşünülürken, bu formasyonu sığ intrüzyonlar olarak kesen Eosen yaşlı volkanitler Tekkeköy Formasyonu volkanitlerinin bir eşleniği olarak yorumlanmıştır. Geç Kretase volkanitleri andezit/bazaltik andezit bileşiminde ve kalk-alkalen, Eosen volkanitleri bazalt/trakiandezit bileşiminde ve şoşonitik karakterlidir. İncelenen tüm örneklerin N-MORB'a göre normalleştirilmiş iz element desenleri, yitimle ilişkili volkanitler için tipik olan, BİYE (Rb, Ba, K, Sr), Th ve HNTE (La, Ce) zenginleşmesi, belirgin negatif Nb-Ta-Ti ve pozitif Pb anomalileri göstermektedir. Şoşonitik kayalar göreceli olarak yüksek Nd_i ($\epsilon\text{Nd}: +4$) ve düşük Sr_i (0.704634) izotopları ile temsil edilirken, kalk-alkalen kayalar tersine düşük Nd_i ($\epsilon\text{Nd}: -3$ 'e kadar) ve yüksek Sr_i (0.705203-0.706956) değerlerine sahiptir. Elde edilen jeokronolojik ve jeokimyasal veriler, yayınlanmış jeolojik bilgiler ile beraber değerlendirildiğinde, Yemişliçay Formasyonu volkanitlerinin Pontid magmatik yayında bir yay-önü ortamda oluştuğuna işaret etmektedir.

Anahtar kelimeler: Yemişliçay formasyonu, Orta pontidler, Yay-Önü, Şoşonit, Jeokronoloji, Jeokimya.

Abstract

In the Central Pontides, Late Cretaceous-Eocene volcanic rocks prominently outcrop around Sinop-Samsun. The Late Cretaceous volcanites are represented by the Hamsaros volcanites near Sinop in the north and volcanic units in the Yemişliçay Formation around Alaçam-Dikmen-Durağan in the south. The Eocene volcanites are represented by the Tekkeköy Formation outcropping in a large area from Bafra to the East. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, mineral- and whole-rock geochemistry of the (sub)volcanic units in the Yemişliçay Formation will be presented in this study. The Yemişliçay Formation volcanites include plagioclase (An_{50-70}), clinopyroxene (augite-diopside), amphibole (mainly magnesio-hastingsite, rarely tschermakite) phenocrysts and opaque minerals. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from the volcanites show that volcanic activity occurred two different time as Late Cretaceous (~71 Ma, inverse isochron age) and Eocene (~48 Ma, plateau age). The Late Cretaceous volcanites were considered as products of the volcanism contemporaneous with the deposition of the Yemişliçay Formation, but as shallow intrusions in this formation, the Eocene volcanites were interpreted to be continuation of volcanites of the Tekkeköy Formation. The Late Cretaceous volcanites are andesite/basaltic andesite and calc-alkaline, but the Eocene volcanites basalt/trachyandesite and shoshonitic in character. N-MORB-normalized trace element patterns of all the volcanites are characterized by strong enrichments in LILE (Rb, Ba, K and Sr), Th and LREE (La, Ce), prominent negative Nb-Ta-Ti and positive Pb anomalies, all characteristic for subduction-related volcanites. The shoshonitic samples possess relatively high Nd_i ($\epsilon\text{Nd}: +4$) and low Sr_i (0.704634) isotopes whereas calc-alkaline rocks have low Nd_i ($\epsilon\text{Nd}: \text{down to } -3$) and high Sr_i (0.705203-0.706956) isotopes. The obtained geochronological and geochemical data together with the published geological information reveal that the Yemişliçay Formation volcanites formed in a fore-arc setting in the Pontide magmatic arc.

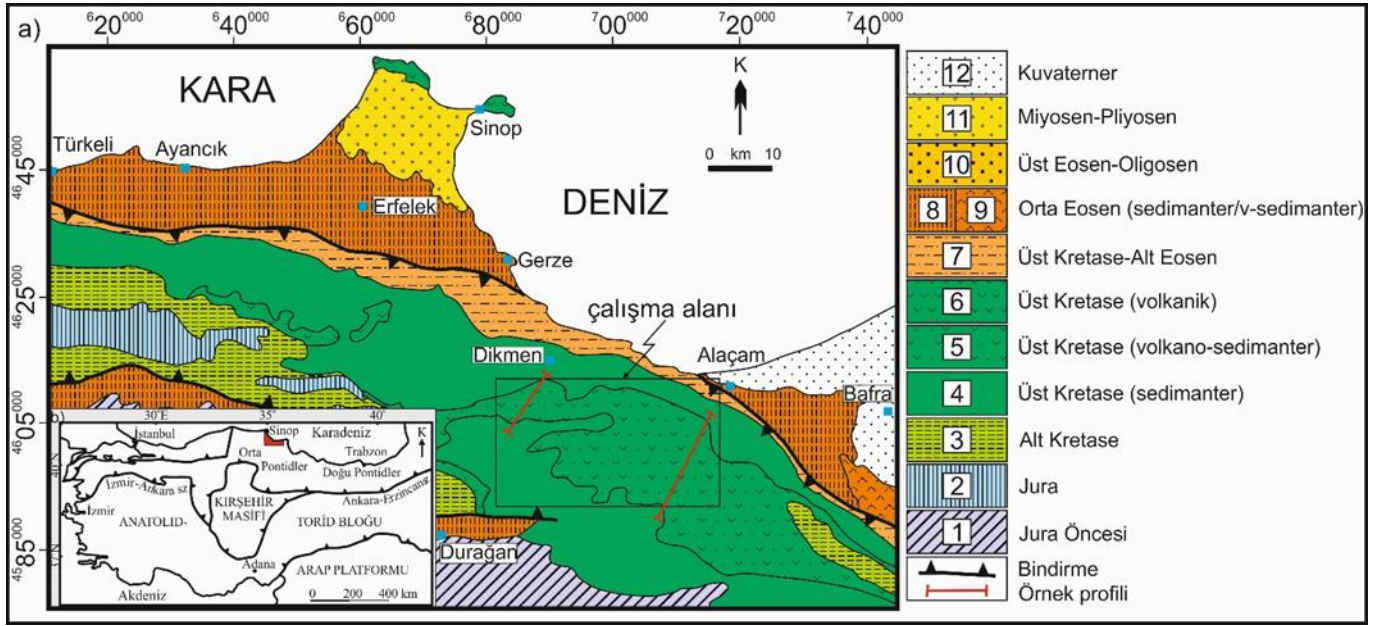
Keywords: Yemişliçay formation, Central pontides, Fore-Arc, Shoshonite, Geochronology, Geochemistry.

1 Giriş

Türkiye üç farklı tektonik birlikten oluşmaktadır. Bu tektonik birlikler Pontidler, Anatolid-Toridler ve Arap Platformudur [1]. Pontidler orojenik bir kuşak olup, İzmir-Ankara-Erzincan suture zonunun (İAESZ) kuzeyinde, doğu-batı doğrultusu boyunca uzanmaktadır (Şekil 1). Pontidler ile Anatolid-Toridler arasındaki sınırı İAESZ belirlemektedir. Bu suture zonu Neotetis okyanusunun kuzeye dalarak kapanmasının bir ürünüdür [2].

Coğrafi olarak batı, orta ve doğu olmak üzere üç sektöre ayrılan Pontidler, jeolojik olarak Istranca masifi, İstanbul ve Sakarya zonlarından meydana gelmektedir. Bu üç zon Kretase'de birleşerek tek bir kıta konumunu almıştır. Orta Pontidlerde yüzeyleyen eklojit ve mavi şistlerden elde edilen bulgular, Neotetis'in Erken Kretase'de Pontidlerin altına dalmaya başladığını gösterse de, Pontid magmatik yayı Geç Kretase'de oluşmaya başlamıştır [3].

*Yazışılan yazar/Corresponding author



Şekil 1. (a): Orta Pontidlerin kuzey bölümünün sadeleştirilmiş jeoloji haritası [7],[8]: 1: Metamorfik temel, 2: Akgöl Fm., Bürnük Fm. ve Akkaya Kçt., 3: Çağlayan Fm., 4: Cankurtaran Fm., 5: Yemişliçay Fm., Kapanboğazı Fm., 6: Hamsaros Volkanitleri, 7: Akveren Fm., Atbaşı Fm., 8: Yenikonak Fm., Gökırmak Fm., 9: Tekkeköy Fm., 10: Sakızdağ Fm., 11: Sinop Fm., Sarıkum Fm., 12: Alüvyon. (b): Türkiye'nin basitleştirilmiş tektonik haritası [9].

Figure 1. Simplified geological map of the north of the Central Pontides [7],[8]: 1: Metamorphic basement, 2: Akgöl Fm., Bürnük Fm. and Akkaya limestone, 3: Çağlayan Fm., 4: Cankurtaran Fm., 5: Yemişliçay Fm., Kapanboğazı Fm., 6: Hamsaros Volcanites, 7: Akveren Fm., Atbaşı Fm., 8: Yenikonak Fm., Gökırmak Fm., 9: Tekkeköy Fm., 10: Sakızdağ Fm., 11: Sinop Fm., Sarıkum Fm., 12: Alluvium. (b): Simplified tectonic map of Turkey [9].

Geç Kretase yayına ait magmatik birimlerin kayıtları en iyi Doğu Pontidler'de görülmesine rağmen, tüm Karadeniz sahili boyunca bu birimlere rastlamak mümkündür.

Bir volkanik yay sistemi başlıca dört ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar volkanik cephe (volcanic front), yay-önü (fore-arc), yay-ardı (back-arc) ve hendek (trench)'dir. Dalım (yitim) yönünün ve yayın zamansal/mekânsal evriminin belirlenebilmesi için, bu bölümlerin yay sisteminde doğru konumlandırılması gerekmektedir. Özellikle yay-önü ve yay-ardı havzalarında gözlenen volkanik birimlerin incelenmesi bu anlamda özel önem taşımaktadır [4]. Birçok araştırmacı Pontidler boyunca dalımın kuzeye doğru olduğunu kabul etmesine rağmen, bazı araştırmacılar dalım yönünün güneye olduğunu savunmaktadırlar [5],[6]. Bu durum Pontidler üzerine birçok jeolojik, jeokimyasal ve jeokronolojik veri üretilip-araştırma yapılmasına rağmen, hala yeni çalışmalara ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır. Yukarıda belirtilen tartışmalara katkı sağlayabileceği düşüncesiyle, bu çalışmada Orta Pontidler'de Sinop güneyinde (Dikmen-Durağan-Alaçam) yüzeyleyen volkanojenik bir istif olan Geç Kretase yaşlı Yemişliçay Formasyonu içindeki volkanik birimler konu edilmiştir. Bu volkanik birimlerden elde edilen mineral ve tüm kayaç kimyası (ana oksit, iz element ve Sr-Nd İzotopları) verileri ile Ar-Ar yaş verisi beraber değerlendirilerek, volkanitlerin kökeni tartışılacaktır.

2 Jeolojik konum

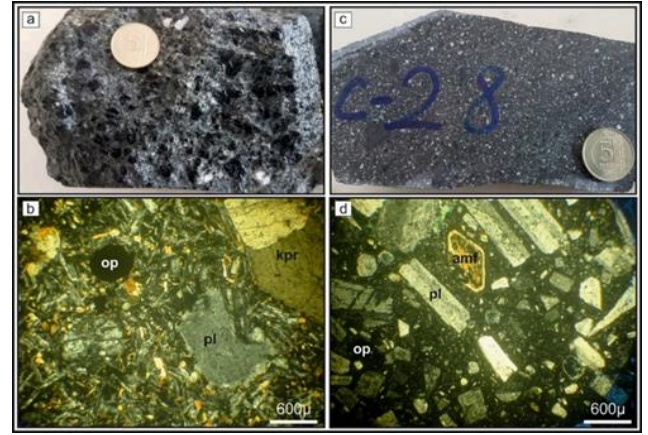
Permo-Karbonifer yaşlı granitik ve düşük dereceli metamorfik kayaçlar Orta Pontidler'in Variskan temelini oluşturur. Bu temel üzerinde Triyas yaşlı Küre Kompleksi yer almaktadır.

Önemli oranda türbiditik birimlerden oluşan bu karmaşık Orta Jura yaşlı bazaltik lavlar ve şeyller tarafından örtülmekte veya intrüzyonlar tarafından kesilmektedir. Jura yaşlı bu volkanik ve intrüzyif kayaçlar belirgin bir yitim (dalma-batma) bileşeni ile karakteristiktir ve bu dönemdeki kıtasal bir magmatik yaya işaret eder [10]. Küre kompleksi ve Orta Jura magmatik birimleri Geç Jura yaşlı karasal (Bürnük Formasyonu) ve sığ denizel (İnaltı Formasyonu) sedimanları tarafından örtülmektedir. Erken Kretase yaşlı, kalın bir kırıntılı istif oluşturan Çağlayan Formasyonu bu birimleri uyumsuz olarak örter. Geç Kretase'de Orta Pontidler yaygın bir yay volkanizmasına ev sahipliği yapmıştır. Bu volkanizma kuzeyde Sinop çevresinde Hamsaros volkanitleri ile temsil edilmektedir. Hamsaros volkanitleri yüksek-K kalk-alkalen, şoşonitik ve potasik lavlardan oluşmaktadır. Ar-Ar radyometrik yaş verileri bu volkanizmanın 82 Milyon yıl (My) yaşında olduğuna işaret etmektedir [11]. Kuzeyde konumlanmış bu yayın güneyi ise tipik olarak yay-önü havza konumundadır. Bu yay-önü havzalarda kalınlıkları binlerce metreyi bulan türbiditler çökelmiştir. Volkanojenik filiş karakterli Yemişliçay Formasyonu bu yay-önü havzada çökelmiş, yaygın volkanik ara katkılar içeren en önemli istiflerden biridir. Yemişliçay Formasyonunun, Durağan (Sinop) kuzeyinde (çalışma alanı dışında) belirgin yüzlekler veren volkanik ürünleri, önceki araştırmalarda Çokran Üyesi [12] veya Dodurga Volkanitleri [13] adı altında incelenmiştir. Andezitik-dasitik volkanitler ve bunların volkaniklastik eşleniklerinden oluşan bu birimden derlenen bir örnek üzerinde, radyometrik yaşlandırma yapılmış (102.2±2.7 My; K-Ar tüm kayaç) ve volkanitlerin çoğunlukla yüksek-K kalk-alkalen karakterli olduğu vurgulanmıştır [13]. Geç Kretase'den Eosen sonlarına kadar

4 Bulgular

4.1 Mineraloji ve petrografi

İncelenen örnekler bazaltik ve andezitik olmak üzere iki farklı volkanik kayalık grubundan oluşmaktadır. Bazaltik örnekler, plajiyoklas, klinopiroksen ve opak mineral fenokristalleri içermekte olup, porfirik dokuludur. Bazaltların iri klinopiroksen-firik makro dokusu ayırt edicidir (Şekil 2a, b). Bazaltların hamuru mikrolitiktir ve intergranüler doku gözlenmektedir. Fenokristal fazı oluşturan mineraller hamurda da gözlenmekle beraber, plajiyoklas hamurda hakim durumdadır. Bazaltik kayalar genel olarak taze durumda olup, alterasyondan önemli derecede etkilenmemiştir. Andezitik örnekler porfirik dokuludur, ve plajiyoklas, amfibol, klinopiroksen ve opak mineral fenokristalleri içermektedir. Andezitlerin plajiyoklas-firik doğası karakteristiktir (Şekil 2c, d). Amfiboller opasitleşme, plajiyoklaslar ise serizitleşme/killeşme türü alterasyon göstermektedir. Andezitlerin hamuru camsıdan ince-taneliye kadar değişmekte ve hamurda yer yer ikincil alterasyon ürünleri (klorit, kalsit ve zeolit vb.) dikkati çekmektedir.



Şekil 2. İncelenen bazaltik (a, b; C43 No.lu örnek) ve andezitik (c, d; C28 No.lu örnek) volkanik kayaların dokusal ve mineralojik özelliklerini gösteren makro ve mikro-fotolar. pl: plajiyoklas, kpr: klinopiroksen, amf: amfibol, op: opak mineral.

Figure 2. Macro-and micro-photos showing textural and mineralogical features of the investigated basaltic (a, b; sample C43) and andesitic (c, d; sample C28) volcanic rocks. Pl: plagioclase, kpr: clinopyroxene, amf: amphibole, op: opaque minerals.

Analizi yapılan plajiyoklaslar kalsik bileşimlerle karakterize olup, labrador (An₅₀₋₇₀) bileşimine sahiptir (Şekil 3; EK A). Plajiyoklaslardaki zonlanmalar genelde zayıftır (normal ve ters). Ancak, bazı fenokristallerde kuvvetli normal zonlanmalar da gözlenmektedir.

Klinopiroksen megakristal, izole fenokristal, glomerokristal ve hamur mikrofenokristalleri olarak yaygın olarak gözlenir. Megakristal ve fenokristallerde ikizlenme ve zonlanma yaygındır. Klinopiroksenler bazaltlarda diyopsitik ojit, andezitlerde ojit bileşime sahiptir (Şekil 4; Ek B).

Yeşil-kahve amfiboller glomerokristal ve özşekilli fenokristaller olarak yaygındır. Analizi yapılmış amfiboller kalsiktir, yaygın olarak magnezyo-hastingsit ve nadiren çermakit (ayrı bir grafik olarak gösterilmemiştir) olarak sınıflanırlar (Şekil 5; EK C).

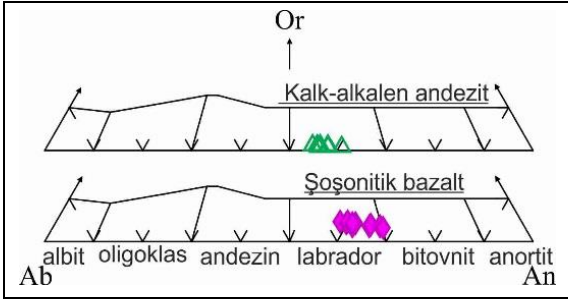
bölgede denizel sedimantasyon hüküm sürmeye devam ederken, yaygın Eosen volkanizması buna eşlik etmiştir. Orta Pontidlerde Eosen volkanizması, Bafra'dan başlayıp doğuya doğru geniş bir alanda yüzeyleyen volkano-sedimanter Tekkeköy Formasyonu ile temsil edilmektedir. Tekkeköy Formasyonu volkanitleri bazaltik-andezitik bileşimde ve (yüksek-K) kalk-alkalenden şoşonitiğe kadar değişen jeokimyasal karaktere sahiptir [12],[14]. Oligosen sonrasında ise bölge göl-akarsu sistemi ile ilişkili sedimantasyonun etkisinde kalmıştır (Şekil 1).

3 Materyal ve yöntem

Bu çalışma kapsamında, belirlenen iki profil boyunca yüzeyleyen volkanik kayalardan jeokimyasal amaçlı yaklaşık yirmi el örneği alınmıştır. Alınan örneklerden elde edilen ince kesitler üzerinde, Olympus-marka polarizan mikroskop yardımıyla mineralojik-petrografik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Elektron mikropob analizleri (EPMA) için parlatılmış ince kesitler karbonla kaplanmıştır. Bu işlemden sonra, analizler JEOL 8600 cihazıyla McGill Üniversitesi (Kanada) elektron mikropob laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Analiz sırasında 15 kV voltaj, 20 nA akım ve her bir element için 20 sn. ölçüm süresi kullanılmıştır. Ayrıca, düzeltme için ZAF prosedürü kullanılmıştır.

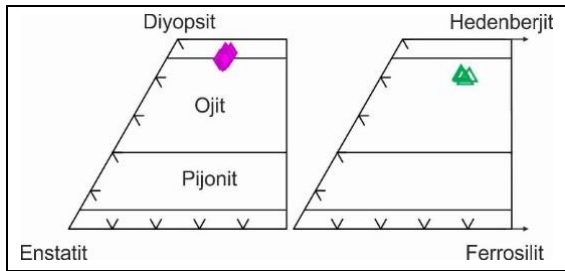
Az veya bozuşma göstermeyen örneklerden bir set, toz haline getirilerek, tüm kayalık ana oksit ve iz element analizleri yapılmıştır. Bu analizler Bureau Veritas Minerals laboratuvarlarında (Kanada) gerçekleştirilmiştir. Lityum borat ile eritme işlemi takiben, 0.2 gr toz örnek seyreltik asit ile parçalanmıştır. Son olarak toz örnekler asit ile çözme işlemine tabi tutulmuştur. Ana oksitler ICP-AES, iz elementler ise ICP-MS cihazı ile analiz edilmiştir. Cihazların kalibrasyonu için laboratuvar-ıçi STD SO-18 ve STD S7 referans materyalleri kullanılmıştır. Bu analizleri takiben seçilen bir örnek setinin (tüm kayalık toz örnekleri) ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ve ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd izotopik oranları GEOMAR'da (Almanya) ölçülmüştür. Toz örnekler, 150 °C'de, 60 saat süre ile ultra-saf HF ve HNO₃ çözeltileri içinde parçalama işlemine tabi tutulmuştur. Kimyasal arıtma ve ayırma işleminden sonra, örnekler kurutulmuştur. Örnekler cihaza gönderilmeden önce %5'lik HNO₃ içinde tekrar çözülmüştür. Tüm izotopik ölçümler Nu Plasma MC-ICP-MS NP059 ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde GSJ JNdi-1 (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd: 0.512115) ve NIST SRM 987 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr: 0.710248) standartları kullanılmıştır.

Son olarak iki örneğin ⁴⁰Ar/³⁹Ar metoduyla yaş tayinleri yapılmıştır. Bu analizler Norveç'te (Geological Survey of Norway, ⁴⁰Ar/³⁹Ar Laboratory) gerçekleştirilmiştir. Jeokronolojik analizler için plajiyoklas mineral ayırımı ve tüm kayalık örnekleri kullanılmıştır. Örnekler, öncelikle kırma-öğütme-elekleme işlemine tabi tutularak, 180-250 µm aralığındaki boyuta indirgenmiştir. Frantz-manyetik ayırıcı ve ağır sıvılar (lityum polytungstate) kullanılarak mineral ayırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm kayalık ve mineral ayırımıları 5 dakika süreyle %5'lik HCl içinde yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemi takiben, örnekler artırlmış su ve aseton ile tekraren temizlenmiştir. Sonra, kapanım içermeyen mineraller binoküler mikroskop altında elle seçilmiştir. Örneklerin ³⁹K(n,p)³⁹Ar dönüştürme işlemi McMaster Üniversitesinde (Hamilton, Kanada) gerçekleştirilmiştir. Mineral ayırımıları için CO₂-laser Map215 ve tüm kayalık örnekleri için Furnace Map215 cihazları ile kademeli ısıtma işlemi yapılarak yaşlandırma analizleri Norveç'te tamamlanmıştır.



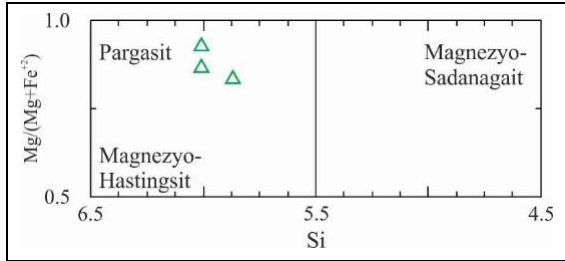
Şekil 3. İncelenen volkanik kayalardaki plajiyoklasların Ab (Albit)-An (Anortit)-Or (Ortoklas) diyagramında sınıflaması [15].

Figure 3. Classification of plagioclases of the investigated volcanic rocks in the Ab (Albite)-An (anorthite)-Or (Orthoclase) diagram [15].



Şekil 4. İncelenen volkanik kayalardaki piroksenlerin sınıflaması [16]. Semboller Şekil 3 ile aynıdır.

Figure 4. Classification of pyroxenes of the investigated volcanic rocks [16]. Symbols as in Figure 3.



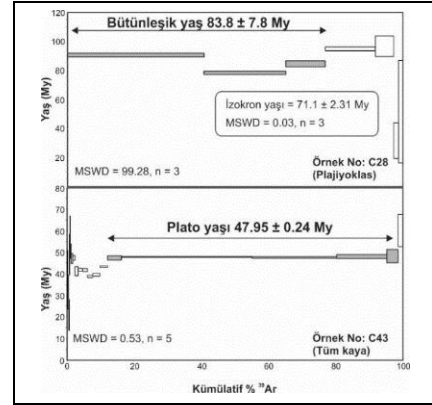
Şekil 5. İncelenen volkanik kayalardaki amfibollerin sınıflaması [17]. Semboller Şekil 3 ile aynıdır.

Figure 5. Classification of amphiboles of the investigated volcanic rocks [17]. Symbols as in Figure 3.

4.2 Ar-Ar jeokronolojisi

Yemişliçay Formasyonu, volkaniklastik ve volkanik kayaç düzeyleri içeren kumtaşı, marn, kumlu kireçtaşı ardalanması ile karakteristik bir volkano-sedimanter istifdir [12],[18]. Bu formasyonun volkanik düzeylerinden derlenen iki adet örnek (C28 ve C43) üzerinde Ar-Ar yaşlandırma çalışması yapılmış ve sonuçları aşağıda tartışılmıştır (Şekil 6).

C28 andezit örneğinden ayrılan plajiyoklas minerali üzerinde yaşlandırma çalışması yapılmış, ancak oldukça dağılmış bir spektrum elde edilmiştir. Bu durum plajiyoklasın alterasyonundan kaynaklanan fazlalık argona işaret etmektedir. Ancak, bu örnek üzerinde gerçekleştirilen ters izokron hesaplaması jeolojik olarak anlamlı olabilecek bir yaş üretmek 71.1±2.31 My yaşını vermektedir. Diğer taraftan, C43 No.lu tüm-kayaç bazalt örneği 47.95±0.24 My olarak hesaplanan bir plato yaşı vermektedir.



Şekil 6. Yemişliçay Formasyonuna ait iki adet volkanik kayaç örneğinin (C28, andezit ve C43, bazalt) Ar-Ar yaş spektrisi.

Figure 6. Ar-Ar age spectra for two volcanic rock samples (C28, andesite and C43, basalt) from the Yemişliçay formation.

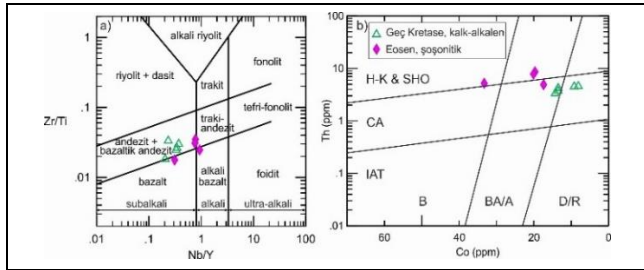
Bu bazaltın taze oluşu ve yaş değerinin düzgün bir platodan elde edilmesi, bu sonucun güvenilir olduğuna işaret etmektedir. Böylece Yemişliçay Formasyonundan derlenen volkanik örneklerin Geç Kretase ve Eosen olmak üzere iki farklı yaşa sahip olduğu ortaya çıkmaktadır.

Önceki çalışmalarda Yemişliçay Formasyonu içindeki volkanik birimlerin tümü "lav akıntısı" olarak yorumlanmış ve formasyonla eş yaşlı olduğu düşünülmüştür [12]. Ancak, radyometrik veriye dayanmayan bu görüşün eksik olduğunu değerlendirmekteyiz. Yeryüzüne yakın derinliklere (çoğun birkaç km.) sokulum yapmış sığ intrüzyonlar (dayk, sil vb.) hızlı soğuyarak lav akıntılılarıyla benzer dokusal görünüm kazanırlar ve bu durumda bunları lav akıntılılarından ayırmak oldukça zorlaşır. Her ne kadar, çevre kayaçlarla olan dokanak ilişkisine dayanarak, bir sığ intrüzyonu lav akıntısından ayırmak mümkün olsa da, özellikle çevre kayaçların tabaka/foliasyon düzlemlerine paralel olarak yerleşmiş magmatik birimlerin (sil ve gömülü lav akıntısı) ayırımı ve dolayısıyla bunların göreceli yaşlandırılmasında bazı sorunlar ortaya çıkar. Sığ intrüzyonlar yüzeydeki mevcut bir volkanizmayı besleyen magmatik sistemler olarak gelişebildiği gibi, sonradan farklı magmatik sistemler olarak da gelişebilirler. İlk durumda sığ intrüzyonların hem lav akıntılıları hem de kestikleri sedimanter birimler ile yakın yaş ilişkisi içinde olması beklenirken, ikinci durumda sığ intrüzyonlar daha genç, farklı bir magmatizmaya ilişkili olacaktır. Böylece ilk defa bu çalışmada yaşlandırılan iki örnekten; C28 nolu örneğin Yemişliçay Formasyonu ile eş yaşlı bir Geç Kretase volkanizmasının ürünü olduğu, C43 No.lu örnekte elde edilen yaşın ise Eosen'de gelişen farklı bir volkanik faaliyetle ilişkili olduğu öne sürülebilir. Eosen volkanizması Pontidler boyunca yaygın yüzlekler vermektedir. Bu volkanik faaliyet Orta Pontidlerde yine bir volkano-sedimanter istif olan Tekkeköy Formasyonu ile temsil edilmektedir [19]. Birim Bafra güneyinden başlayıp doğuya doğru geniş bir alanda uzanmaktadır. Eosen yaşlı bu Formasyon, volkaniklastik ara katkılı, kumtaşı, çamurtaşı, marn ardalanması ve volkanik birimlerden oluşmaktadır. Tekkeköy Formasyonu-volkanitleri, bazaltik-andezitik lavlar ve sığ intrüzyif kütlelerden (dayk, porfir) oluşmaktadır [12],[14]. Tarafımızdan yapılan arazi gözlemleri ve radyometrik yaş bulgusu, C43 No.lu bazaltik örneğin, Tekkeköy Formasyonu içindeki sığ intrüzyonlarla ilişkili olabileceğine işaret etmektedir. Önceki çalışmalarda belirtilen dokusal ve mineralojik özellikler, Tekkeköy Formasyonu bazaltik

kayaçları ile incelenen bazaltik örneklerin benzer olduğuna işaret etmektedir. Bir sonraki bölümde, incelenen Eosen örnekleri ile Tekkeköy Formasyonu volkanitleri jeokimyasal olarak kıyaslanmaktadır. Bu kıyaslama, incelenen bazaltik örneklerin, Tekkeköy Formasyonu volkanik kayaçlarıyla bileşimsel olarak da benzer olduğunu göstermektedir. Özetle, Yemişliçay Formasyonunu kesen Eosen yaşlı sıg intrüzyonların, Tekkeköy Formasyonu volkanizmasının çalışma alanımızdaki lokal bir eşleştiği olarak yorumlanabileceğini düşünmekteyiz.

4.3 Tüm-kayaç element ve izotop jeokimyası

İncelenen volkanik kayaçlar yüksek ateşte kayıp (%8'e kadar LOI) değerlerine sahiptirler (EK D). Bu durum örneklerin önemli oranda alterasyona maruz kaldıklarını göstermektedir. Bu da volkanik kayaçların sınıflamasında yaygın olarak kullanılan TAS (toplam alkali-silika) ve SiO₂-K₂O gibi diyagramların kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada jeokimyasal olarak hareketsiz olduğu düşünülen elementlere dayanılarak geliştirilen alternatif sınıflama diyagramları kullanılmıştır. Nb/Y-Zr/TiO₂ diyagramında, incelenen Eosen örnekleri bazalt, bazaltik andezit, andezit/trakiandezit alanlarına düşerken, Geç Kretase örnekleri andezit-bazaltik andezit alanına düşmektedir (Şekil 7a). Bu diyagramda bir örnek hariç tüm örnekler subalkalen alanda yer almaktadır. Diğer taraftan, SiO₂-K₂O diyagramının alternatifi olan Co-Th diyagramında, Geç Kretase örnekleri kalk-alkalen alana düşerken, Eosen örnekleri yüksek-kalk-alkalen/şoşonitik alanına yer almaktadır (Şekil 7b).



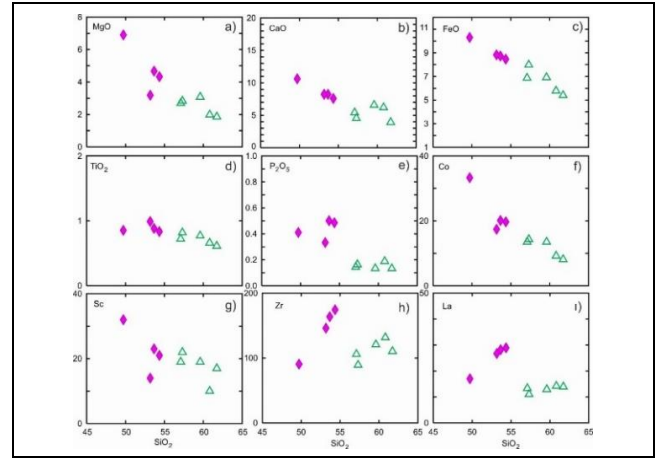
Şekil 7. İncelenen volkanik kayaçların. (a): Nb/Y-Zr/Ti [20] ve (b): Co-Th [21] sınıflama diyagramları. IAT: Ada yayı toleyiti, CA: Kalk-alkalen, H-K & SHO: Yüksek-K kalk-alkalen ve Şoşonitik.

Figure 7. (a): Nb/Y-Zr/Ti [20] and (b): Co-Th [21] classification diagrams of the investigated volcanic rocks. IAT: Island Arc Tholeiite, CA: Calc-alkaline, H-K & SHO: High-K calc-alkaline and shoshonitic

Ana oksit (Şekil 8a-e) ve iz element (Şekil 8f-i) değişim diyagramları incelendiğinde, SiO₂ artarken MgO, CaO, FeO, P₂O₅, TiO₂, Co, Sc, V (gösterilmemiştir) gibi uyumlu ana oksit ve iz elementlerin azaldığı görülmektedir. Diğer taraftan, uyumsuz olan Zr ve La artmaktadır. Bu değişimler Eosen bazaltik kayaçların gelişiminde klinopiroksen (+Fe-Ti oksit+apatit) denetimli; Geç Kretase andezitik kayaçların gelişiminde ise amfibol (+plajiyoklas+Fe-Ti oksit+apatit) denetimli fraksiyonel kristallenmenin (FC) etkili olduğunu göstermektedir. Bu iki seri, ana oksit (Şekil 8a-e) ve uyumlu iz element (Şekil 8f-g) değişim diyagramlarında aynı trend üzerinde yer almasına rağmen, uyumsuz iz element (Şekil 8 h-i) diyagramlarında farklı trend izlemektedir. Bu durum bu iki serinin farklı diferansiyasyon tarihçesine sahip olduğunun göstergesidir.

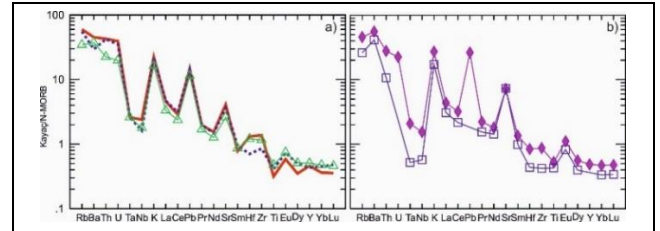
Çoklu-element diyagramlarında, incelenen kayaçların K, Rb, Ba gibi büyük iyon yarıçaplı element (BİYE), Th ve La, Ce gibi hafif nadir toprak elementlerince (HNTE), yüksek alan enerjili

elementlere (YAEE: Nb, Ta, Hf, Zr, Ti ve Y) göre belirgin bir zenginleşme sunmaktadır. Ayrıca örnekler pozitif Pb ve negatif Nb-Ta-Ti anomalisi gösterirler (Şekil 9 a,b). Bu desenler yitim (dalma-batma) ile ilişkili volkanik kayaçlar için tipiktir. Çalışma alanı kuzeyindeki Geç Kretase yaşlı Hamsaros volkanitleri ve güneybatısındaki Dodurga volkanitlerine ait kayaçlar kıyaslama amacıyla Şekil 9a'da gösterilmiştir. Yitimle ilişkili, metasomatik litosferik manto kaynağından türediği belirtilen bu volkanitlerin, Yemişliçay Formasyonu Geç Kretase volkanitleri ile oldukça benzer desene sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 8. İncelenen volkanik birimlerin SiO₂'ye karşı seçilmiş ana oksit (ağ. %) (a-e): ve iz element (ppm) (f-i): değişim diyagramları [22]. Semboller Şekil 7 ile aynıdır.

Figure 8. SiO₂ vs. selected major oxide (wt. %) (a-e) and trace element (ppm) (f-i) variation diagrams of the investigated volcanic rocks [22]. Symbols as in Figure 7.

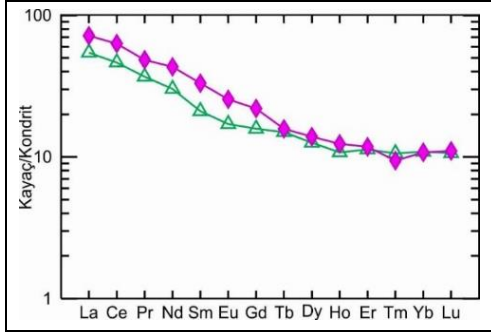


Şekil 9. İncelenen Geç Kretase, (a): ve Eosen, (b): Volkanitlerine ait seçilmiş iki örneğin N-MORB'a [23] göre normalleştirilmiş çoklu-element diyagramı. Diyagramda mavi kesikli çizgi Hamsaros volkanitlerini (andezit) [11], kırmızı düz çizgi Dodurga volkanitlerini (andezit) [13] ve kare sembollü mavi düz çizgi ise Tekkeköy formasyonunu (bazalt) [14] temsil etmektedir. Diğer semboller Şekil 7 ile aynıdır.

Figure 9. N-MORB [23]-normalized multi-element diagram of two selected samples from the Late Cretaceous, (a): and Eocene, (b): Volcanic rocks. Blue dashed line for the Hamsaros volcanites (andesite) [11], red solid line for the Dodurga volcanites (andesite) [13] and square symbol for the Tekkeköy formation (basalt) [14]. Other symbols as in Figure 7.

Diğer taraftan, Şekil 9b'de Tekkeköy Formasyonuna ait bazaltik bir kayacın iz element deseni ile Yemişliçay Formasyonunu kesen Eosen örneklerinin deseni kıyaslandığında, yine büyük oranda bu iki örneğin benzerliği dikkati çekmektedir. Ancak bu çalışmaya konu olan Eosen örneği, diğerine göre birçok uyumsuz element açısından daha fazla zenginleşme göstermektedir.

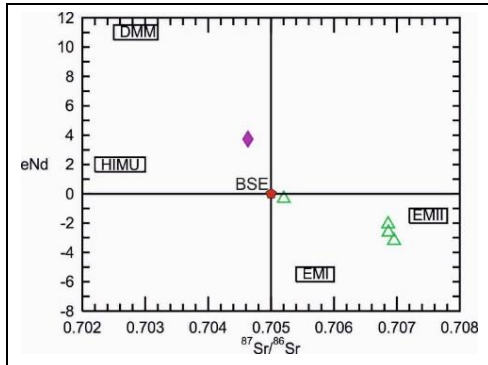
İncelenen volkanik kayalar HNTE'lerce zenginleşmiş (La/LuN= 4-19) ve yatay ANTE desenlerine sahiptir (Şekil 10). Kalk-alkalen kayalar, şoşonitlerle benzer NTE desenine sahiptirler. Ancak, diyagram incelendiğinde, şoşonit örneğinin hafif ve orta NTE açısından kalk-alkalen örneğe göre daha fazla zenginleşmiş desen sunduğu gözlenmektedir.



Şekil 10. Seçilmiş iki örneğin kondrite [24] göre normalleştirilmiş NTE diyagramı. Semboller Şekil 7 ile aynıdır.

Figure 10. Chondrite [24]-normalized REE diagram of two selected samples. Symbols as in Figure 7.

İncelenen volkanik kayaların $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(t)}$ ve $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(t)}$ izotopik oranları geniş bir bileşim aralığında değişmektedir. Şoşonitler göreceli olarak düşük Sri (0.704634), yüksek Ndi (0.512829) izotop oranlarıyla kalk-alkalen örneklerden (Sri: 0.705203-0.706956; Ndi: 0.512474-0.512621) ayrılmaktadır. Böylece şoşonitler, ϵNd : +4 değerleriyle Sr-Nd izotop korelasyon diyagramında toplam yerküreden (BSE) tüketilmiş (DMM) rezervuara doğru, kalk-alkalen örnekler ise ϵNd : -3'e varan değerleriyle zenginleşmiş manto (EMII) tipi rezervuara doğru yönseme gösterirler (Şekil 11).



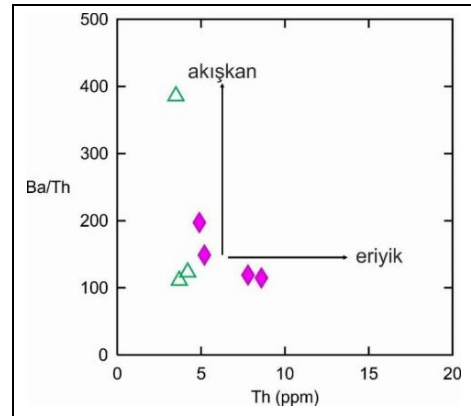
Şekil 11. İncelenen volkanik kayaların Sr-Nd izotop korelasyon diyagramındaki dağılımları. Semboller Şekil 7 ile aynıdır. DMM: tüketilmiş MORB mantosu, HIMU: yüksek μ değerli manto (High μ Mantle), BSE: toplam silikat yerküre (Bulk Silicate Earth), EM: zenginleşmiş manto (Enriched Mantle) [25],[26].

Figure 11. Sr-Nd isotope correlation diagram of the investigated volcanic rocks. Symbols as in Figure 7. DMM: Depleted MORB mantle, HIMU: High μ Mantle, BSE: Bulk Silicate Earth, EM: Enriched Mantle [25],[26].

Yitim zonlarında dalan okyanusal kabuk ve bunun üzerindeki sedimanlardan türeyen eriyik ve akışkanlar mantoya transfer edilerek kaynağı metasomatizmaya uğrattırır. İz element ve izotop oranlarına dayanarak, volkanik kayaların kökenlerinde etkili olan yitim bileşeninin türünü ve yitimden önceki kaynağın bileşimini ortaya koymak mümkündür. Böylesi bir

çalışma için kullanılacak örneklerin oldukça primitif bazaltik örnekler olması beklenmektedir. Ancak, incelenen kayalar içerisinde sadece Eosen örnekleri bazaltik bileşime sahiptir. Şekil 11'de diyagramın sol üst kısmına düşen bazalt örneği (C43), örnek seti içerisindeki en primitif (MgO: % 7) ve en taze örneklerden biri olması nedeniyle, bu amaç için uygundur. Bu örneğin BIYE ve hafif NTE açısından zenginleşmiş (Şekil 9 ve 10), fakat izotopik olarak tüketilmiş bir jeokimyasal karakter sergilemesi, göreceli olarak tüketilmiş N-MORB benzeri bir kaynağın genç (Mesozoyik-Senozoyik) bir yitim zonu metasomatizmasına uğradığını ortaya koymaktadır. Diğer taraftan kalk-alkalen andezitik örneklerin zenginleşmiş manto-II (EMII) kaynağına doğru yönelim göstermesi kaynak alan ve/veya magma odası süreçlerine işaret edebilmektedir. Okyanus adası bazaltlarının (OIB) Nd izotopik bileşimindeki orta, Sr izotopik bileşimindeki aşırı zenginleşme için tanımlanan bu kaynak; üst kıtasal kabuk bileşimine karşılık gelmekte ve OIB türü kayaların manto kaynağına geri kazanılan okyanusal kabuk+sedimanlara işaret etmektedir [25],[27]. İncelenen andezitik kayalar için EMII-tipi bu rezervuar, manto kaynağının yitimle ilişkili olarak üst kabuk malzemesi tarafından kirletilmesi (mantle contamination) şeklinde yorumlanabilir. Ancak bu kayaların oldukça farklılaşmış doğası, kaynak alan üzerine kesin yorumlar yapabilmeyi oldukça zorlaştırmaktadır. Diğer taraftan, andezitlerin izotopik olarak zenginleşmiş doğası, andezitleri oluşturan ana magmanın farklılaşması esnasında, fraksiyonel kristallenmeye kıtasal kabuk asimilasyonunun (AFC) da eşlik etmesi olarak yorumlanabilir. Bu süreçte çalışma alanı yakın çevresinde yüzeyleyen metamorfik temel kayaları (Şekil 1), potansiyel kirletici (asimilant) olarak rol almış olabilir.

Ba ve Th iz elementlerinin eriyik ve akışkan faz içindeki farklı davranışları, yitim bileşenlerinin türünü belirlemede önemli avantajlar sunmaktadır. Th dalan okyanusal kabuk üzerindeki sedimanlardan türemiş eriyiklerde zenginleşirken, Ba ise tersine akışkan fazı tercih etmektedir [28]. Eosen bazaltik örneklerinin Th-Ba/Th diyagramındaki dağılımları incelendiğinde (Şekil 12), bunların bileşimlerinin hem akışkan hem de eriyik faz tarafından kontrol edildiği söylenebilir. Diğer taraftan, bu diyagram Geç Kretase andezitlerinin (MgO içerikleri % ~3.0 olan örnekler kullanılmıştır), akışkan-benzeri bir metasomatik bileşenden etkilendiğini göstermektedir.



Şekil 12. İncelenen volkanik kayaların Th'ye karşı Ba/Th diyagramındaki dağılımları [28]. MgO içerikleri % ≥ 3.0 olan örnekler kullanılmıştır. Semboller Şekil 7 ile aynıdır.

Figure 12. Th vs. Ba/Th plot for the investigated volcanic rocks [28]. Samples with ≥ 3.0 % MgO were used in the diagram. Symbols as in Figure 7.

5 Sonuçlar

Orta Pontidler'de Sinop güneyinde (Dikmen-Durağan-Alaçam) Yemişliçay Formasyonu yaygın yüzlekler vermektedir. Bu formasyon, oldukça kalın bir volkanojenik filiş istifinden oluşmaktadır. Formasyon içinde volkaniklastikler hakim konumda, (sub)volkanik kayalar ise hacimsel olarak düşük oranda bulunmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi vermek mümkündür:

1. Yemişliçay Formasyonu içindeki volkanitler jeokronolojik-jeokimyasal olarak iki farklı yaş ve seriden oluşmaktadır,
2. Bunlardan birincisi Geç Kretase yaşlı kalk-alkalen andezitik kayalar, diğeri ise Eosen yaşlı şoşonitik bazaltik kayalardır,
3. Geç Kretase volkanitleri, Yemişliçay Formasyonu ile eş yaşlı bir volkanizmaya işaret ederken, Eosen yaşlı volkanitler bu formasyon içine sığ intrüzyonlar olarak yerleşmiş olan Tekkeköy Formasyonu volkanitlerinin eşleniği olarak yorumlanmıştır,
4. İncelenen kayaç örnekleri porfirik dokulu olup, plajiyoklas (An_{50-70}), klinopiroksen (ojit-diyopsit), amfibol (magnezyo-hastingsit, nadiren çermakit) ve opak mineral fenokristalleri içermektedir,
5. Her iki kayaç grubu da benzer şekilde yay kayalar için tipik olan uyumsuz iz element desenleri göstermektedir. Ancak şoşonitler uyumsuz iz elementler açısından daha fazla zenginleşmiş doğaya sahiptir,
6. Kalk-alkalen ve şoşonitik kayaların Sr-Nd izotop oranları birbirinden farklıdır. Kalk-alkalen kayalar yüksek Sr-düşük Nd izotopları ile temsil edilirken, şoşonitik kayalar tersi bir izotop sistematiğine sahiptir,
7. İncelenen volkanik kayaların ana magmaları, yitim zonu eriyik ve/veya akışkanlarınca metasomatizmaya uğratılmış litosferik bir manto kaynağından türemiş olmalıdır. Ana magmaların FC ve AFC türü diferansiyasyonu bazaltik ve andezitik kayaların gelişiminde etkili olmuştur,
8. Kuzeyde, Sinop çevresinde yüzeyleyen Geç Kretase yaşlı Hamsaros volkanitlerinin magmatik yayı temsil ettiği düşünüldüğünde, elde edilen veriler Yemişliçay Formasyonu volkanitlerinin yay-önü ortamda oluştuğu görüşünü desteklemektedir.

6 Conclusions

The Yemişliçay Formation extensively outcropped in the South of Sinop in the Central Pontides. This formation is composed of thick volcanogenic flysch sequence. Volcaniclastics are dominated in the formation whereas subvolcanic rocks are volumetrically minor. The main conclusions are following:

1. Volcanites in the Yemişliçay formation includes geochronologically-geochemically two distinct ages and series,
2. One of these is the Late Cretaceous calc-alkaline andesitic rocks, the other one is the Eocene shoshonitic basaltic rocks,
3. The Late Cretaceous volcanic rocks point to a contemporaneous volcanism with the age of the

Yemişliçay Formation, but the Eocene volcanites emplaced into this formation as shallow intrusions are interpreted to be equivalent of the Tekkeköy Formation,

4. The investigated rock samples are porphyritic with phenocrysts of plagioclase (An_{50-70}), clinopyroxene (augite-diopside), amphibole (magnesian-hastingsite, rare tschermakite) and opaques,
5. Both of groups show the same incompatible trace element patterns typical for arc rocks. However, the shoshonites are more enriched in terms of incompatible trace elements,
6. The calc-alkaline and shoshonitic rocks have different Sr-Nd isotopic ratios. The calc-alkaline rocks are represented by high Sr-low Nd isotopic ratios, but the shoshonites have low Sr-high Nd isotopic ratios,
7. Parent magmas of the investigated volcanic rocks were derived from a lithospheric mantle source metasomatized by subduction zone melts and/or fluids. FC and AFC-dominated differentiation processes played a role in the evolution of basaltic and andesitic rocks,
8. When the Late Cretaceous Hamsaros volcanites outcropped around Sinop in the North are thought to represent a volcanic arc, the obtained data support an idea that the Yemişliçay Formation occurred in a fore-arc setting.

7 Teşekkür

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 10401022 proje ile desteklenmiştir. Yazarlar maddi desteklerinden dolayı Selçuk Üniversitesine teşekkür ederler. Yazarlar ayrıca PAJES Yayın Kurulu ve ismi belirtilmeyen iki değerli hakeme teşekkür ederler.

8 Kaynaklar

- [1] Ketin İ. "Anadolu'nun tektonik birlikleri". *MTA Dergisi*, 66, 20-34, 1966.
- [2]ılmaz Y, Tüysüz O, Yiğitbaş E, Can Genç Ş, Şengör AMC. *Geology and Tectonic Evolution of the Pontides*. Editor: Robinson AG. Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region, 183-226, Tulsa, USA, American Association of Petroleum Geologists 68, 1997.
- [3] Okay AI. "Geology of Turkey: A synopsis". *Anschnitt*, 21, 19-42, 2008.
- [4] Tatsumi Y, Stern RJ. "Manufacturing Continental Crust in the Subduction Factory". *Oceanography*, 19(4), 104-112, 2006.
- [5] Eyüboğlu Y. "Late Cretaceous high-K volcanism in the eastern Pontide orogenic belt: implications for the geodynamic evolution of NE Turkey". *International Geology Review*, 52(2-3), 142-186, 2010.
- [6] Eyuboglu Y, Chung S-L, Santosh M, Dudas FO, Akaryalı E. "Transition from shoshonitic to adakitic magmatism in the eastern Pontides, NE Turkey: Implications for slab window melting". *Gondwana Research*, 19(2), 413-429, 2011.

- [7] Korkmaz S. Boyabat (Sinop) Kuzeydoğusunun Petrol Yönünden Jeolojik ve Jeokimyasal İncelemesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 1984.
- [8] Gedik A, Korkmaz S. "Sinop havzasının jeolojisi ve petrol olanakları". *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 8(1), 53-80, 1984.
- [9] Okay AI, Tüysüz O. *Tethyan sutures of Northern Turkey*. Editors: Durand B, Jolivet L, Hovarth F, Séranne M. The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen, 475-515, London, England, Geological Society of London Special Publications 156, 1999.
- [10] Okay AI, Nikishin AM. "Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region". *International Geology Review*, 57(5-8), 1051-1076, 2015.
- [11] Asan K, Kurt H, Francis D, Morgan G. "Petrogenesis of the late Cretaceous K-rich volcanic rocks from the Central Pontide orogenic belt, North Turkey". *Island Arc*, 23(2), 102-124, 2014.
- [12] Gedik A, Ercan T, Korkmaz S. "Orta Karadeniz (Samsun-Sinop) havzasının jeolojisi ve volkanik kayaçların petrolojisi". *MTA dergisi*, 99/100, 34-50, 1983.
- [13] Görmüş NY. Boyabat Yöresi (Sinop) Volkanik Kayaçlarının Petrolojisi ve Jeokimyası. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2009.
- [14] Temizel İ, Arslan M. "İkizce (Ordu) yöresindeki Tersiyer yaşlı kalk-alkalen volkanitlerinin mineral kimyası ve petrokimyası, KD Türkiye". *Yerbilimleri*, 26(1), 25-47, 2005.
- [15] Deer WA, Howie RA, Zussman J. *An Introduction to the Rock Forming Minerals*. 2nd ed. Essex, England, Longman. 696. 1992.
- [16] Morimoto N. "Nomenclature of pyroxenes". *Mineralogical Journal*, 14(5), 198-221, 1989.
- [17] Leake BE, Woolley AR, Birch WD, Burke EAJ, Ferraris G, Grice JD, Hawthorne FC, Kisch HJ, Krivovichev VG, Schumacher JC, Stephenson NCN, Whittaker EJW. "Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature". *Mineralogical Magazine*, 68(1), 209-215, 2004.
- [18] Ketin İ, Gümüş Ö. "Sinop-Ayancık Arasında 3. Bölgeye Dahil Sahaların Jeolojisi Hakkında Rapor". TPAO, Ankara, Türkiye, 288, 1963.
- [19] Yoldaş R, Keskin B, Korkmaz S, Didik S, Kalkan İ, Ağrıdağ D, Besbelli B. "Samsun ve Dolayının (Kızılırmak-Yeşilirmak arasındaki bölge) Jeolojisi ve Petrol Olanakları". MTA, Ankara, Türkiye, 8130, 1985.
- [20] Pearce JA. *A User's Guide to Basalt Discrimination Diagrams*. Editor: Wyman DA. Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for massive sulphide exploration, 79-113, Winnipeg, Canada, Geological Association of Canada, 1996.
- [21] Hastie AR, Kerr AC, Pearce JA, Mitchell SF. "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, 2007.
- [22] Harker A. *The Natural History of Igneous Rocks*. New York, USA, Macmillan, 1909.
- [23] Hofmann AW. "Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust". *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3), 297-314, 1988.
- [24] Sun S, McDonough WF. *Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Compositions and Processes*. Editors: Saunders AD, Norry MJ. Magmatism in the Ocean Basins, 313-345, London, England, Geological Society of London Special Publication 42, 1989.
- [25] Hofmann AW. *2.03- Sampling Mantle Heterogeneity through Oceanic Basalts: Isotopes and Trace Elements*. Editors: Holland HD, Turekian KK. Treatise on Geochemistry, 1-44, Oxford, England, Pergamon, 2007.
- [26] Allègre CJ, Hart SR, Minster JF. "Chemical structure and evolution of the mantle and continents determined by inversion of Nd and Sr isotopic data, I. Theoretical methods". *Earth and Planetary Science Letters*, 66, 177-190, 1983.
- [27] Willbold M, Stracke A. "Formation of enriched mantle components by recycling of upper and lower continental crust". *Chemical Geology*, 276(3-4), 188-197, 2010.
- [28] Kirchenbaur M, Münker C, Schuth S, Garbe-Schönberg D, Marchev P. "Tectonomagmatic Constraints on the Sources of Eastern Mediterranean K-rich Lavas". *Journal of Petrology*, 53(1), 27-65, 2012.

EK A

Ek A: Seçilmiş plajiyoklasların elektron mikroprob analiz sonuçları (FeO*, FeO cinsinden toplam demirdir. m: merkez, o: orta, k: kenar, Ab: Albit, An: Anortit, Or: Ortoklas).

Appendix A: Microprobe analysis results of the selected plagioclases (FeO*, total iron as FeO. m: core, o: middle, k: rim, Ab: Albite, An: Anorthite, Or: Orthoclase)

	Şoşonitik bazalt					Kalk-alkalen andezit				
	fl-55	fl-56m	fl-56o	fl-56k	fl-57	fl-44m	fl-44k	fl-45m	fl-45k	fl-46
SiO ₂	50.20	51.82	52.83	51.90	52.33	52.64	52.94	54.31	52.81	53.88
TiO ₂	0.01	0.05	0.06	0.05	0.08	0.02	0.02	0.06	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	31.08	29.87	29.68	30.15	29.94	29.61	29.44	28.84	29.48	29.27
FeO*	0.84	0.79	0.84	0.64	0.69	0.41	0.47	0.47	0.46	0.42
MnO	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
MgO	0.14	0.12	0.12	0.10	0.06	0.04	0.07	0.05	0.06	0.08
CaO	13.65	12.32	12.14	12.46	12.45	12.30	11.66	11.15	11.82	11.36
Na ₂ O	3.26	3.88	4.00	3.84	3.94	4.34	4.67	5.05	4.71	4.82
K ₂ O	0.53	0.72	0.76	0.69	0.61	0.21	0.27	0.29	0.25	0.26
Toplam	99.72	99.59	100.43	99.83	100.10	99.57	99.54	100.22	99.59	100.12

Ek A: Devamı.
Appendix A: Continued.

Şoşonitik bazalt					Kalk-alkalen andezit					
32 oksijene göre formül										
Si	9.21	9.49	9.58	9.47	9.52	9.59	9.64	9.81	9.62	9.74
Al	6.72	6.44	6.34	6.48	6.41	6.36	6.32	6.13	6.33	6.23
Ti	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Fe2	0.13	0.12	0.13	0.10	0.11	0.06	0.07	0.07	0.07	0.06
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02
Ca	2.68	2.42	2.36	2.44	2.43	2.40	2.28	2.16	2.31	2.20
Na	1.16	1.38	1.41	1.36	1.39	1.53	1.65	1.77	1.66	1.69
K	0.12	0.17	0.18	0.16	0.14	0.05	0.06	0.07	0.06	0.06
Toplam	20.06	20.05	20.02	20.04	20.02	20.01	20.04	20.03	20.07	20.01
Ab	29.20	34.80	35.70	34.40	35.10	38.50	41.40	44.30	41.30	42.80
An	67.60	61.00	59.80	61.60	61.30	60.30	57.10	54.00	57.30	55.70
Or	3.10	4.20	4.50	4.10	3.60	1.20	9.64	9.81	9.62	9.74

EK B

EK B: Seçilmiş piroksenlerin elektron mikroprob analiz sonuçları (Fe⁺² ve Fe⁺³ ayırımı stokiometrik olarak hesaplanmıştır. m: merkez, k: kenar, Wo: Wollastonit, En: Enstatit, Fs: Ferrosilit).

Appendix B: Microprobe analysis results of the selected pyroxenes (Fe⁺² and Fe⁺³ separation was stoichiometrically calculated. m: core, k: rim, Wo: Wollastonite, En: Enstatite, Fs: Ferrosilite)

Şoşonitik bazalt					Kalk-alkalen andezit					
	PX-52m	PX-52k	PX-53	PX-54m	PX-54k	PX-48	PX-49m	PX-49k	PX-50	PX-51m
SiO ₂	49.20	48.02	47.90	49.65	49.67	52.10	51.44	51.38	51.20	50.97
TiO ₂	0.78	0.91	0.83	0.75	0.64	0.34	0.43	0.43	0.31	0.39
Al ₂ O ₃	4.66	5.76	7.22	4.05	3.85	1.35	1.60	1.53	1.63	1.65
FeO	8.08	7.91	7.58	7.94	7.64	10.99	11.00	11.15	11.85	11.16
Cr ₂ O ₃	0.01	0.03	0.31	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
MnO	0.22	0.19	0.13	0.26	0.25	0.37	0.39	0.36	0.38	0.39
MgO	14.40	13.85	13.89	14.62	15.08	14.60	14.40	14.52	14.15	14.32
CaO	21.41	22.07	22.08	21.37	21.88	20.34	20.43	20.28	19.54	19.92
Na ₂ O	0.51	0.42	0.56	0.48	0.38	0.28	0.29	0.24	0.31	0.30
K ₂ O	0.04	0.04	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01
Toplam	99.31	99.20	100.52	99.16	99.45	100.39	100.00	99.92	99.42	99.11
6 oksijene göre formül										
TSi	1.83	1.79	1.76	1.85	1.84	1.94	1.92	1.92	1.93	1.92
TAl	0.17	0.21	0.25	0.15	0.16	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07
TFe3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
M1Al	0.03	0.04	0.07	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M1Ti	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
M1Fe3	0.14	0.15	0.16	0.12	0.15	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08
M1Fe2	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.12	0.11	0.11	0.12	0.11
M1Cr	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M1Mg	0.80	0.77	0.74	0.81	0.83	0.81	0.80	0.81	0.79	0.80
M1Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M2Mg	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M2Fe2	0.10	0.08	0.07	0.10	0.09	0.16	0.15	0.16	0.18	0.16
M2Mn	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
M2Ca	0.85	0.88	0.87	0.85	0.87	0.81	0.82	0.81	0.79	0.80
M2Na	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
M2K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Toplam	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Wo	44.67	46.30	46.56	44.41	44.63	41.07	41.39	40.99	40.06	40.77
En	41.81	40.43	40.75	42.28	42.80	41.02	40.59	40.84	40.36	40.78
Fs	13.52	13.27	12.69	13.31	12.57	17.91	18.02	18.17	19.58	18.46

EK C

EK C. Seçilmiş amfibollerin elektron mikroprob analiz sonuçları (Mg#: Mg/(Mg+Fe²⁺)).

Appendix C: Microprobe analysis results of the selected amphiboles (Mg#: Mg/(Mg+Fe²⁺)).

Kalk-alkalen andezit							
	AM-9	AM-10	AM-11	AM-12	AM-13	AM-14	
SiO ₂	42.33	53.56	40.53	41.10	41.87	42.73	
TiO ₂	1.84	0.35	1.98	1.83	1.83	2.50	
Al ₂ O ₃	13.51	3.30	14.60	14.28	13.71	12.08	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.02	0.00	0.05	0.00	0.02	
FeO	10.93	10.10	11.67	11.53	11.74	14.40	
MnO	0.18	0.47	0.17	0.19	0.18	0.21	
MgO	15.19	12.55	13.85	14.54	14.21	12.78	
CaO	11.52	17.60	11.88	11.35	11.54	11.23	
Na ₂ O	2.35	1.26	2.37	2.24	2.31	2.07	
K ₂ O	0.65	0.34	0.68	0.60	0.68	0.72	
Toplam	98.5	99.54	97.72	97.71	98.06	98.73	
23 oksijene göre formül							
Si	6.01	8.16	5.87	5.88	6.01	6.16	
Al ^{IV}	1.99	0.00	2.13	2.12	1.99	1.84	
Al ^{VI}	0.27	0.59	0.36	0.29	0.33	0.22	
Ti	0.20	0.04	0.22	0.20	0.20	0.27	
Cr	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
Fe ³⁺	1.06	0.00	0.86	0.42	0.95	0.89	
Fe ²⁺	0.24	1.29	0.55	0.96	0.46	0.84	
Mn	0.02	0.06	0.02	0.02	0.02	0.03	
Mg	3.21	2.85	2.99	3.10	3.04	2.75	
FMT	13	13	13	13	13	13	
Ca	1.75	2.87	1.84	1.74	1.77	1.74	
Na	0.65	0.37	0.67	0.62	0.64	0.58	
K	0.12	0.07	0.13	0.11	0.12	0.13	
Toplam	15.52	16.31	15.63	15.47	15.54	15.45	
Mg#	0.93	0.69	0.84	0.76	0.87	0.77	

EK D

EK D. İncelenen volkanik kayaların ana oksit, iz element ve Sr-Nd izotop analiz sonuçları.

Appendix D. Major oxide, trace element and Sr-Nd isotope analysis results of the investigated volcanic rocks.

Ana oksit (wt%)	Kalk-alkalen					Şösonit			
	C-28	C-29	C-30	C-37	C-31B	C-39	C-38	C-42	C-43
SiO ₂	60.54	55.47	58.10	58.13	56.04	49.30	51.50	51.12	48.43
TiO ₂	0.60	0.70	0.75	0.63	0.80	0.81	0.79	0.95	0.83
Al ₂ O ₃	17.62	18.52	17.44	17.22	18.02	15.14	15.77	17.49	15.00
FeO _{Tot}	5.29	6.67	6.74	5.52	7.80	8.02	8.02	8.49	10.03
MnO	0.05	0.07	0.10	0.15	0.18	0.16	0.16	0.18	0.17
MgO	1.82	2.62	3.00	1.89	2.77	4.29	4.10	3.06	6.72
CaO	3.85	5.26	6.41	5.92	4.44	7.56	7.19	7.92	10.35
Na ₂ O	6.46	6.16	3.10	3.90	4.09	2.79	3.16	3.92	2.65
K ₂ O	1.70	1.54	1.70	2.03	3.47	3.33	3.59	2.69	2.83
P ₂ O ₅	0.13	0.14	0.13	0.18	0.16	0.46	0.46	0.32	0.40
LOI	1.8	2.7	2.4	4.2	1.9	7.8	4.9	3.6	2.2
Toplam	99.83	99.82	99.82	99.77	99.69	99.68	99.67	99.70	99.65
İz element (ppm)									
Sc	17.0	19.0	19.0	10.0	22.0	23.0	21.0	14.0	32.0
V	118	153	121	133	217	207	201	215	289
Cr	88.9	47.9	54.7	27.4	27.4	102.6	116.3	34.2	177.9
Co	8.1	13.5	13.5	9.2	14.3	20.1	19.7	17.4	33.3
Ni	12.6	10.2	6.3	3.6	2.5	27.3	20.1	4.8	22.4
Cu	7.9	26.2	10.8	29.8	28.0	51.7	53.7	39.1	145.8
Zn	32	61	71	39	68	49	46	39	49
Ga	13.2	18.3	18.2	17.5	18.6	16.4	16.1	18.7	16.1
Rb	35.0	33.3	43.5	42.8	98.9	73.2	74.8	62.2	57.8
Sr	480.5	440.5	294.9	627.3	720.3	768.3	851.2	728.0	813.0

EK D: Devamı.

Appendix D: Continued.

	Kalk-alkalen					Şoşonit			
Y	16.2	16.6	18.1	20.9	18.5	22.6	22.6	25.0	17.4
Zr	110.3	105.9	120.8	131.6	89.2	163.6	174.4	146.0	90.6
Nb	6.0	5.5	6.2	4.9	3.8	17.2	17.6	23.4	5.4
Cs	1.9	2.2	1.4	0.7	2.0	0.8	1.0	1.2	13.4
Ba	498	410	517	813	1350	929	986	966	774
La	13.9	13.3	12.9	14.2	11.0	28.2	28.9	26.7	17.0
Ce	28.9	26.1	28.4	28.5	25.4	57.6	57.7	51.9	38.6
Pr	3.41	3.18	3.50	3.63	3.25	6.84	6.82	6.12	4.60
Nd	13.6	12.9	14.1	16.2	12.8	27.7	27.5	23.9	20.2
Sm	2.83	2.84	3.22	3.41	3.26	5.42	5.56	5.16	5.07
Eu	0.82	0.85	0.99	1.03	0.95	1.53	1.57	1.58	1.48
Gd	2.86	2.86	3.25	3.43	3.38	4.72	4.66	4.78	4.51
Tb	0.51	0.52	0.56	0.58	0.55	0.75	0.78	0.80	0.59
Dy	2.77	2.95	3.20	3.46	2.95	4.01	4.15	4.53	3.53
Ho	0.62	0.61	0.61	0.74	0.67	0.78	0.80	0.84	0.70
Er	1.93	1.95	1.87	2.19	1.99	2.3	2.46	2.42	1.95
Tm	0.27	0.30	0.27	0.35	0.30	0.36	0.36	0.38	0.24
Yb	1.86	2.00	1.85	2.45	1.93	2.34	2.50	2.62	1.83
Lu	0.29	0.32	0.27	0.37	0.30	0.35	0.36	0.37	0.28
Hf	3.0	3.3	3.6	3.7	2.9	4.5	4.5	4.3	2.5
Ta	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	1.1	1.2	1.6	0.4
Pb	13.7	17.8	5.6	3.3	6.0	2.0	3.3	7.0	12.9
Th	4.6	3.7	4.2	4.5	3.5	7.8	8.6	4.9	5.2
U	2.4	1.7	1.4	1.5	0.9	2.1	2.1	1.6	1.6
İzotopik oran									
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$	0.706866	0.706862	0.706956		0.705203				0.704634
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(i)}$	0.512503	0.512532	0.512474		0.512621				0.512829

İlksel (i) izotopik oranları hesaplanırken, kalk-alkalen örnekler için 71 My, şoşonit örnekleri için 48 My yaşları kullanılmıştır.
71 Ma for the calc-alkaline and 48 Ma for the shoshonite samples were used in the calculation of initial (i) isotopic ratios