



## Gümüşhane (Doğu Pontidler, Türkiye) yöresindeki Jura yaşlı plütonik kayalar oluşturan magma(lar)ın yerleşim koşulları

### *Emplacement conditions of magma(s) forming Jurassic plutonic rocks in Gümüşhane (Eastern Pontides, Turkey)*

Emre AYDINÇAKIR<sup>a\*</sup>, Ramazan GÜNDÜZ<sup>b</sup> ve Cem YÜCEL<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye.

<sup>b</sup>Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye.

<sup>c</sup>Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye.

*Araştırma Makalesi*

Anahtar Kelimeler:

Mineral kimyası,  
Jeotermobarometre, Jura  
magmatizması, Doğu  
Pontidler, Gümüşhane,  
Türkiye.

**ÖZ**

Bu çalışmada, Doğu Pontidler'in güneyinde dar bir alanda yüzeylenen Alemdar ve Işıkdere (Gümüşhane) Plütonları'nın petrografisi, mineral kimyası ve kristallenme koşulları incelenmiştir. Bu plütonlar, yaklaşık olarak KD-GB istikametinde uzanım göstermekte olup, Erken-Orta Karbonifer yaşlı Gümüşhane Granitoyidi ile Erken-Orta Jura yaşlı Şenköy formasyonunu keserek yerleşmişlerdir. Çalışma konusu olan Alemdar ve Işıkdere Plütonları'nı oluşturan kayalar ince-orta taneli olup, kuvars-diyorit, kuvarslı monzodiyorit ve tonalit bileşimlidirler. İncelenen plütonlar genellikle taneli, poikilitik, monzonitik, yazı dokusu ve nadiren porfirik doku göstermekte olup, plajiyoklaz ( $An_{0.5-0.92}$ ), hornblend ( $Mg\# = 0.52-0.81$ ), biyotit ( $Mg\# = 0.32-0.67$ ), ortoklaz, kuvars ve Fe-Ti oksit içermektedirler. Termobarometre hesaplamalarına göre plütonların kristallenme sıcaklıkları 541°C ile 938°C, basınç değerleri 0.1 ile 4.4 kbar, oksijen fugasitesi ( $fO_2$ ) -23 ile -12 ve hornblendlerden hesaplanan su içerikleri ise % 4,4-7,8 arasında değişmektedir. Tüm bu termobarometre verilerine göre, incelenen plütonların, orta-sığ kabuk derinlerinde (~4-15 km) kristalleşerek yerleştikleri söylenebilir.

Geliş Tarihi: 31.05.2019

Kabul Tarihi: 19.11.2019

Keywords:

Mineral chemistry,  
Geothermobarometer,  
Jurassic magmatism,  
Eastern Pontides,  
Gümüşhane, Turkey.

**ABSTRACT**

*In this study, the petrography, mineral chemistry and crystallization conditions were reported for the Alemdar and Işıkdere plutons located in limited areas in the south of the Eastern Pontides. These plutons, which trend mostly in NE-SW directions, were emplaced by cutting the Early-Middle Carboniferous-aged Gümüşhane Granitoid and Early-Middle Jurassic Şenköy formation. Petrographically, the studied plutons are compositionally fine to medium grained quartz-diorite, quartz monzodiorite and tonalite. The rocks in the plutons have granular, poikilitic, monzonitic, graphic and rare porphyritic textures with consist of plagioclase, ( $An_{0.5-0.92}$ ), hornblende ( $Mg\# = 0.52-0.81$ ), biotite ( $Mg\# = 0.32-0.67$ ), orthoclase, quartz and Fe-Ti oxide. According to thermobarometric calculations, plutons have crystallization temperatures, pressures and oxygen fugacity values ranging from 541°C to 938°C, 0.1 to 4.4 kbar, and -23 to -12, respectively. The estimated water content calculated from amphibole is between 4.4 to 7.8%. It can be concluded that the studied plutons were emplaced at mid to shallow crustal depths (~4-15 km).*

Atf bilgisi: Aydınçakır, E., Gündüz, R., Yücel, C. 2020. Emplacement conditions of magma(s) forming Jurassic plutonic rocks in Gümüşhane (Eastern Pontides, Turkey). Bulletin of the Mineral Research and Exploration 162, 177-198.

<https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.649808>

\* Başvurulacak yazar: Emre AYDINÇAKIR, [aydincakir61@gmail.com](mailto:aydincakir61@gmail.com)

## 1. Giriş

Çalışma alanını içine alan Doğu Pontid Orojenik Kuşağı (KD Türkiye), volkanik ve plütonik kayalar topluluklarından oluşmaktadır (Karslı vd., 2007, 2012; Kaygusuz vd., 2008, 2018; Dokuz, 2011; Temizel vd., 2012; 2018, 2019a, 2019b; Aydınçakır ve Şen, 2013; Arslan vd., 2013; Aydın, 2014; Yücel vd., 2017). Özellikle, bölge Permo-Karbonifer'den Eosen sonuna kadar çok geniş bir yaş aralığında oluşmuş plütonik ve volkanik kayalara ev sahipliği yapmaktadır (Şekil 1). Karbonifer yaşlı plütonik kayalar (Yılmaz, 1972; Çoğulu, 1975; Topuz vd., 2010; Dokuz, 2011; Kaygusuz vd., 2012, 2016; Karslı vd., 2016; Dokuz vd., 2017a) metamorfik kayaları keserek yerleşmiştir. Bölgede temel kayaları Jura yaşlı volkano-tortul istif (Şenköy formasyonu, Kandemir, 2004) tarafından uyumsuz olarak üstlenmiştir (Kandemir, 2004; Dokuz ve Tanyolu, 2006; Eyüboğlu vd., 2006; Şen, 2007; Kandemir ve Yılmaz, 2009; Genç ve Tüysüz, 2010; Dokuz vd., 2017b). Yitim ilişkili olduğu bilinen Kretase yaşlı plütonik kayalar (Şahin vd., 2004; Kaygusuz ve Aydınçakır, 2009, 2011; Karslı vd., 2010; Kaygusuz vd., 2013; Sipahi vd., 2017; Eyüboğlu vd., 2019; Temizel ve Kurt, 2019; Temizel vd., 2019a) volkanik ve/veya volkanoklastik kayalar ile dokanak ilişkisine sahiptirler. Eosen yaşlı plütonlar (Yılmaz ve Boztuğ, 1996; Arslan ve Aslan, 2006; Karslı vd., 2007, 2011, 2012; Kaygusuz ve Öztürk, 2015; Eyüboğlu vd., 2017; Kaygusuz vd., 2018; Temizel vd., 2018, 2019b) ise tüm serileri keserek yerleşmişlerdir.

Son yıllarda Doğu ve Orta Pontidlerde yapılan sınırlı sayıda çalışmaları, Erken-Orta-Geç Jura döneminde yerleşmiş mafik ve asidik kayaların jeodinamik kökenlerine yönelik olarak gerçekleştirilmiştir (Dokuz vd., 2010; Karslı vd., 2014, 2017; Eyüboğlu vd., 2016; Çimen vd., 2017, 2018). Fakat hala Jura dönemindeki magmatik aktivitenin jeokimyasal özellikleri, açılma ve kapanma yaşları ile ilişkili olduğu düşünülen yitimin yönü tartışmalıdır. Bunun yanında kütlelerin yerleşim koşullarına yönelik bir çalışmanın yapılmaması bu çalışmanın önceki çalışmalardan en önemli farkıdır.

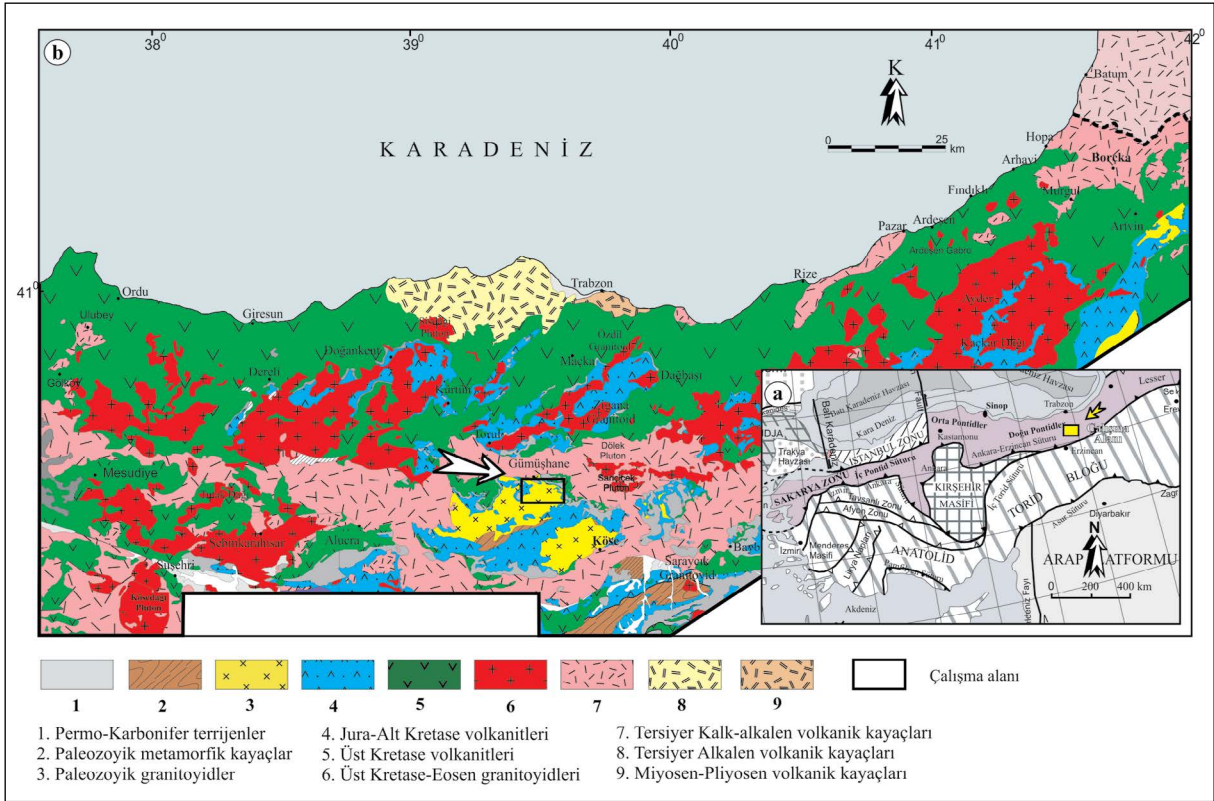
Bu çalışma ile Gümüşhane (Doğu Pontidler) yöresinde dar bir alanda gözlenen Jura yaşlı Alemdar ve Işıkdere Plütonları'nın ilk defa detaylı petrografik ve mineral kimyası verileri irdelenerek; 1) magma (lar) ın kristallenme sırasında etkili olan sıcaklık, basınç ve oksijen fugasitesi gibi fizikokimyasal özellikleri, 2)

fizikokimyasal verileri jeolojik veriler ile birleştirilerek bu kayaları oluşturan magma (lar) ın kabuktaki gelişimlerinin irdelenmesi amaçlanmıştır.

## 2. Bölgesel Jeoloji

Sakaraya Zonu'nda yer alan Doğu Pontid Orojenik Kuşağı'nın en yaşlı birimini Erken-Orta Karbonifer yaşlı gnays, şist, amfibolit, mermer ve az orandaki meta-peridotitlerden oluşan metamorfik temel (Topuz vd., 2004, 2007; Okay vd., 2006; Dokuz, 2011) oluşturur (Şekil 1). Bu kayalar, Orta Karbonifer-Erken Permiyen yaşlı irili ufaklı plütonik kayalar tarafından kesilmiştir (Çoğulu, 1975; Topuz vd., 2010; Dokuz, 2011; Kaygusuz vd., 2012, 2016; Karslı vd., 2016; Dokuz vd. 2017a). Temel metamorfik kayaları uyumsuz olarak örten Geç Karbonifer yaşlı sığ denizel-kıtasa sedimanter kayalar yalnızca Pulur bölgesinde gözlenmektedir (Okay ve Leven 1996; Kandemir ve Lerosey-Aubril 2011). Doğu Pontidler'de Jura kayaları, piroklastik kayalar ile klastik ve kireçtaşı blokları içeren kırıntılılardan oluşmaktadır (Ağar, 1977; Saydam Eker vd., 2012). Doğu Pontidler'de Şenköy formasyonu kısa mesafelerde farklı kalınlıklarda yanall geçiş gösteren andezit, bazalt, aglomera ve diyabazlardan oluşan volkanitler, çakıltası, marn, kiltası, kumtaşı ve kırmızı renkli kireçtaşlarından oluşmaktadır (Dokuz ve Tanyolu, 2006; Şen, 2007). Fakat son zamanlarda yapılan çalışmaları, özellikle yastık debili bazaltların bazik derinlik eşleniklerinin Orta Triyas'tan-Erken Jura'ya kadar değişen yaş aralığında var olduğunu göstermektedir (Dokuz ve Tanyolu, 2006; Eyüboğlu vd., 2010, 2016; Ustaömer ve Robertson, 2010; Karslı vd., 2014). Bölgede, Geç Jura-Erken Kretase tektonik hareketlilik ve magmatik aktivite açısından oldukça kısırır. Bu dönem kayaç litolojisi olarak karbonat çökelimi yaygındır.

Çalışma alanının içine alan Doğu Pontidler, Geç Kretase'de kuzey-güney yönünde plütonik ve volkanik kayaların hâkim olduğu bir litolojiye (Okay ve Şahintürk, 1997; Kaygusuz vd., 2008; Kaygusuz ve Aydınçakır, 2009; Karslı vd., 2012; Aydın, 2014; Yücel, 2017; Demir, 2019) sahiptir. Ayrıca, bölgede yüksek potasyumlu magmatizma yaygındır (Altherr vd., 2008; Eyüboğlu vd., 2010; Gülmez vd., 2016; Aydınçakır, 2016, 2017; Özdamar vd., 2017). Geç Paleosen-Erken Eosen döneminde Anatolid-Torid bloklarının çarpışması gerçekleşmiştir (Okay ve Şahintürk, 1997; Dilek, 2006). Doğu Pontidler'de



Şekil 1- a) Türkiye'nin tektonik birlikleri (Okay ve Tüysüz, 1999'dan değiştirilerek) ve b) Doğu Pontidler'de yüzeylenen volkanik ve magmatik kayaları gösteren jeolojik harita (Güven, 1993; Aydınçakır ve Şen, 2013; Yücel vd., 2017'den değiştirilerek).

Erken Eosen (54-48 My) adakitik ve adakitik olmayan magmatizma (Eyüboğlu vd., 2010, 2013; Topuz vd., 2011; Karşlı vd., 2011; 2013; Dokuz vd., 2013; Aydınçakır, 2014; Temizel vd., 2019b), yay-kıta çarpışmasının son aşaması olarak düşünülmektedir. Bölgede, Eosen dönemi çarpışma sonrası kalk-alkalen volkanik kayalar ile yüksek-K kalk-alkalen ve şoşonitik plütonlar ile temsil edilir (Karşlı vd., 2007, 2012; Aslan, 2010; Temizel vd., 2012, 2018; Aydınçakır ve Şen, 2013; Arslan vd., 2013; Aslan, vd., 2014; Yücel vd., 2017; Eyüboğlu vd., 2017). Eosen sonrasında bölgede kırıntılı kayalar ve Neojen yaşlı alkalen volkanitler görülmektedir (Okay ve Şahintürk, 1997; Aydın vd., 2008; Arslan vd., 2013; Yücel vd., 2014; 2017).

### 3. Materyal ve Yöntem

Saha çalışmalarında öncel jeolojik haritalardan (Güven, 1993; MTA, 2002) faydalanılarak yörenin 1/25000 ölçekli detay jeolojik haritası hazırlanmış, incelenen Alemdar ile Işıkdere plütonlarından petrografik ve mineral kimyası amaçlı kayaç örnekleri

alınmıştır. Kayaçlardan ince kesitler, Gümüşhane Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İnce Kesit Laboratuvarı'nda hazırlanmıştır. Kayaçlardan hazırlanan ince kesitler polarizan mikroskopta incelenerek mineral içeriği ve dokusal özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Modal analiz için Swift marka nokta sayacı kullanılmıştır. Sayım genellikle tane boyutuna göre 0,02-0,04 mm aralığında gerçekleştirilmiş ve her bir kesitte yaklaşık 600-800 nokta sayılmıştır.

Brest'de (Fransa) bulunan Bretagne Occidentale Üniversitesi Geoscience Marines (IFREMER) Elektron Mikroprop Laboratuvarında örneklerin mineral kimyası analizleri gerçekleştirilmiştir. Mineral kimyası analizi yapılacak örnekler karbon kaplı parlak kesitler üzerinde, CAMECA-SX-100 WDS marka bir alet kullanılarak yapılmıştır. Makinenin özellikleri 15 Kv elektron bombardımanı ve 20 nA bombardıman akısı'dır. Si, Al, Ti, Fe, Mn, Mg, Ca, Na ve K elementlerinin sayılma zamanı 10 sn olarak ayarlanmıştır. Hornblend ve Fe-Ti oksit analizleri için 1 µm'lik nokta ışını, feldispat ve mika mineralleri analizlerinde ise sodyum buharlaşması sonucu oluşacak kayıpları önlemek için çok hafif

defokuslamış (10 µm) ışın kullanılmıştır. Analizlerin doğal mineral standartları forsterit, diyopsit, ortoklas, albit, anortit, biyotit, apatit, vollastonit ve magnetittir. Ana elementler için %1'den ve iz elementler için ise 200 ppm den daha az analitik hata ile analizler yapılmıştır.

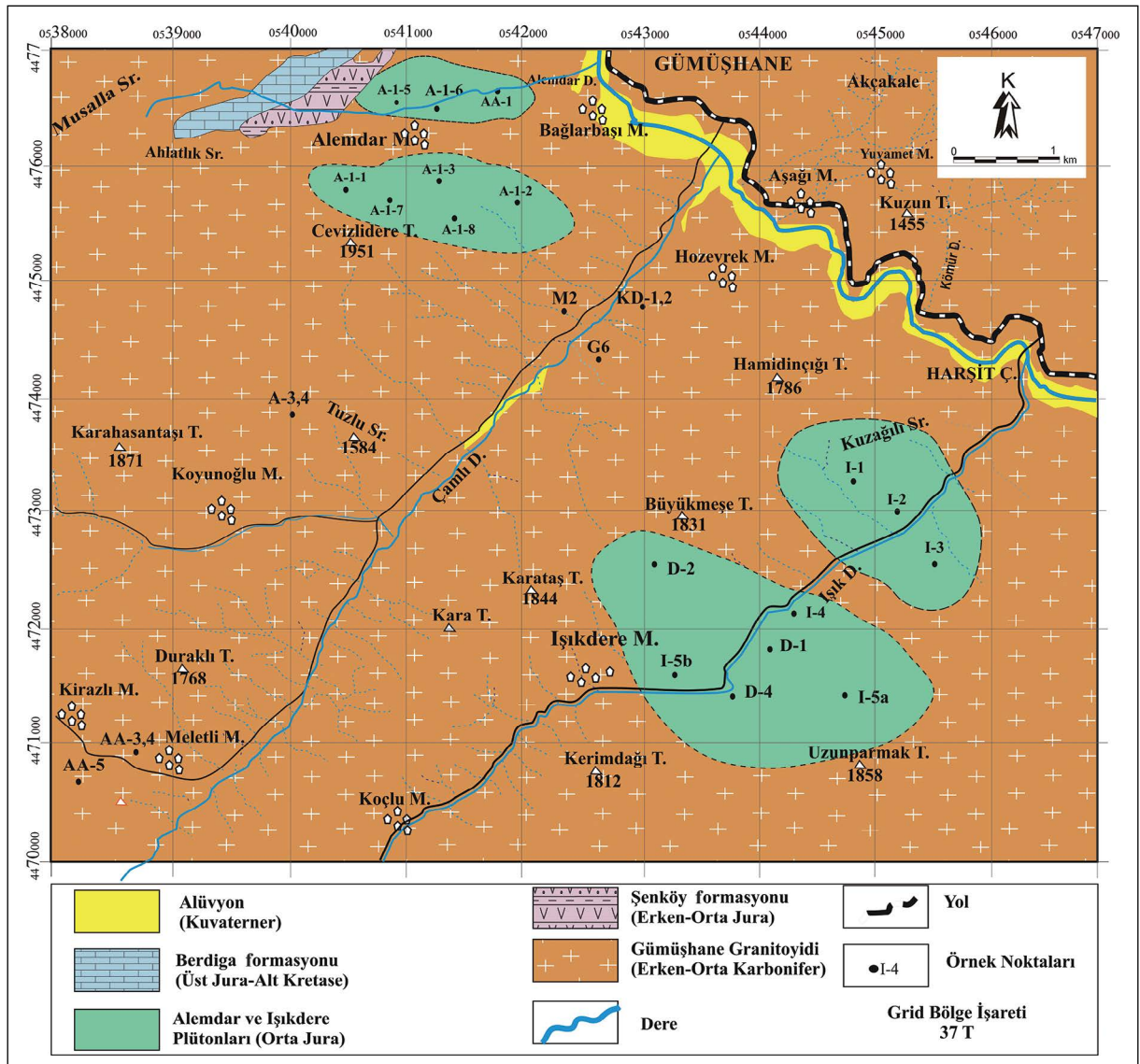
#### 4. Bulgular

##### 4.1. Plütonların Jeolojik Konumları

Alemdar ve Işıkdere plütonlarının bulunduğu çalışma alanının temelini Erken-Orta Karbonifer yaşlı Gümüşhane Granitoyidi (Çoğulu, 1975; Topuz vd., 2010) oluşturmaktadır (Şekil 2). Temel kayacı

oluşturan Gümüşhane Granitoyidi uyumsuz olarak Erken-Orta Jura yaşlı çakıltaşı, marn, kumtaşı, silttaşı, tüf, kırmızı renkli fosilli kireçtaşı ile asidik-bazik lav, dayk ve silden oluşan Şenköy formasyonu (Kandemir, 2004) tarafından örtülmektedir (Şekil 2). Şenköy formasyonu Üst Jura- Alt Kretase yaşlı karbonatlı kireçtaşlarından oluşan Berdiga formasyonu (Pelin, 1977) tarafından uyumlu olarak örtülmektedir. Kuvaterner yaşlı alüvyonlar en genç birimdir (Şekil 2).

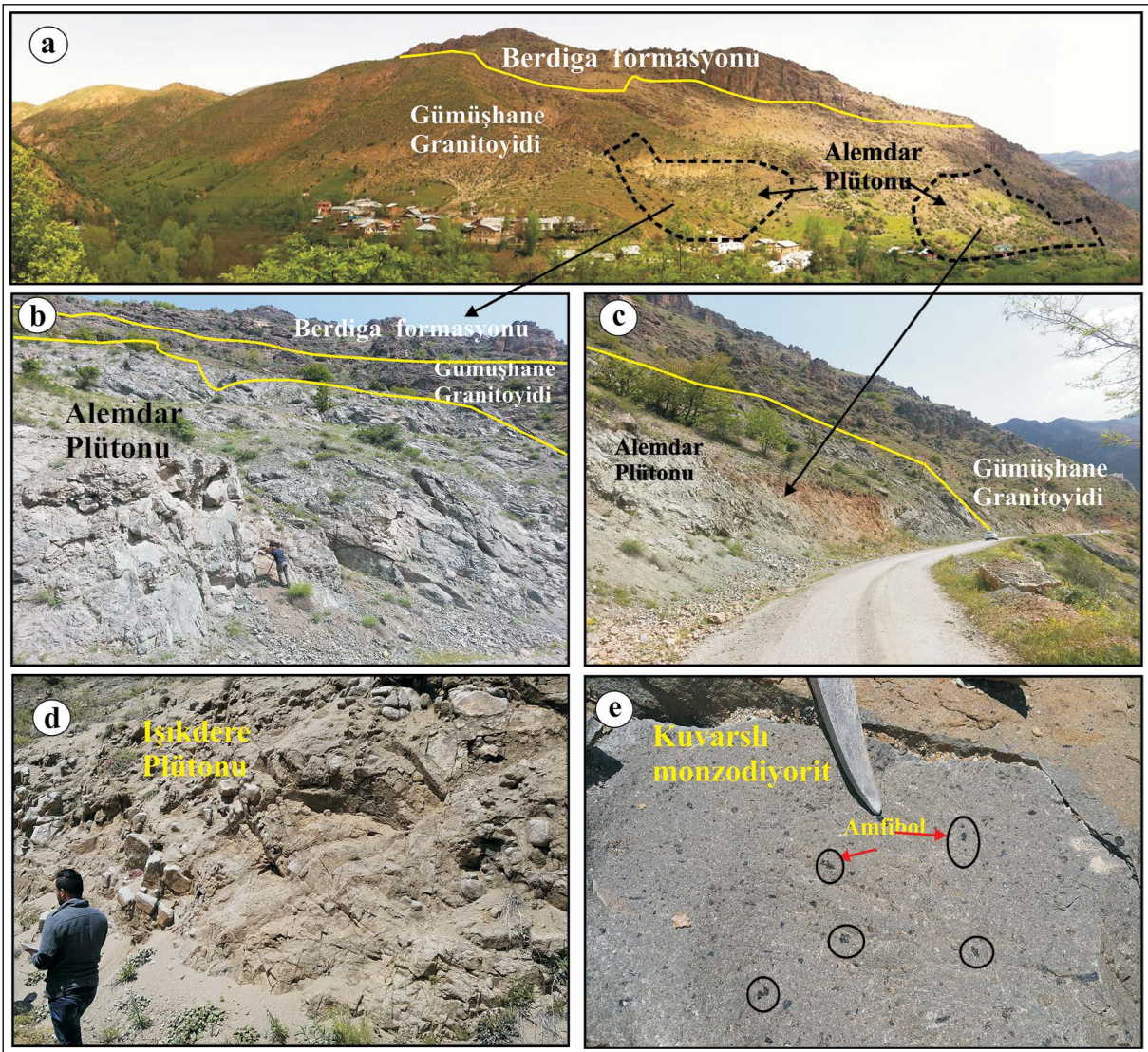
İncelenen Alemdar Plütonu, Gümüşhane ili güneyinde Bağlarbaşı beldesi, Alemdar Mahallesi ve Cevzlidere Tepe civarında yaklaşık 7-8 km<sup>2</sup> lik bir alan kaplamaktadır (Şekil 2). Alemdar Plütonu, Erken-Orta



Şekil 2- Çalışma sahasının jeolojik haritası.

Karbonifer yaşlı Gümüşhane Granitoyidi'ni ve Erken-Orta Jura yaşlı Şenköy formasyonuna ait volkanik ve volkano-tortul kayaçlarını keserek yerleşmiştir (Şekil 3a). Saha gözlemleri, dokanak ve yan kayaç ilişkilerine göre plütunun yaşı ilk kez bu çalışmada Jura olarak kabul edilmektedir. Alemdar Plütunu, elips şekline sahip ve (Şekil 2) oldukça sert, çatlaklı ve kırıklı yapı sunar. Ayrıca küçük bloklar şeklinde yüzeyleme vermektedir (Şekil 3a, b). Plütunun yan kayaç ile olan dokanak zonlarında epidotlaşma ve silisleşme gözlenmiştir (Şekil 3c). Sahada genellikle kafalar şeklinde yüzeyleme verir. Bol miktarda hornblend ve biyotit gibi ferromagnezyen mineral içeriğinden dolayı rengi genellikle gri-koyu gri olup ve orta-ince

tanelidirler (Şekil 3d, e). Işıkdere Plütunu ise Işık Dere vadisi boyunca güneybatıya gidildiğinde Işıkdere Mahallesi ve çevresinde yüzeyleme veren iki kütle olarak bulunmaktadır. Işıkdere Plütunu'nu oluşturan kütleler, kuzeybatı-güneydoğu istikametinde, yaklaşık elips şeklinde yerleşmiştir (Şekil 2). Işıkdere Plütunu, Gümüşhane Granitoyidi'ni keserek yerleşmiştir (Şekil 2). Plütun, Gümüşhane Granitoyidi'nden koyu gri ve/veya yeşilimsi gri renginden dolayı kolaylıkla ayırt edilmektedir (Şekil 3d). Işıkdere Plütunu'nu oluşturan kayaçlar oldukça taze görümlü ve içerdikleri mafik minerallerin belirgin olmasıyla tanınmaktadırlar (Şekil 3e).



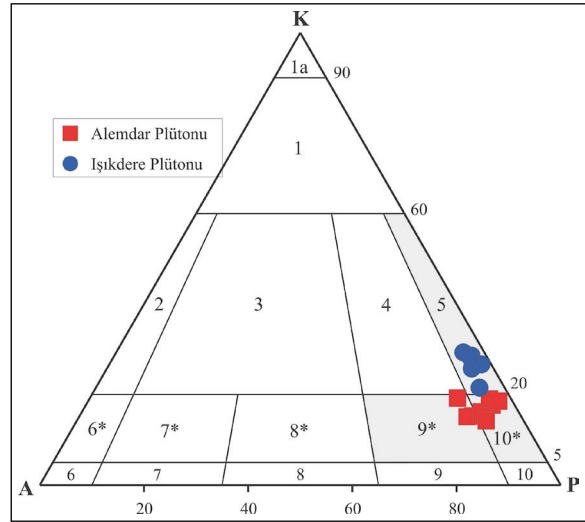
Şekil 3- a) Alemdar Plütunu'nun ve çevre kayaçların dokanak ilişkileri (Alemdar Mah., foto kuzeye doğru çekilmiştir), b-c) Alemdar Plütunu ile Gümüşhane Granitoyidi arasındaki dokanak ilişkisi (Alemdar Mah.), d) Işıkdere Plütunu'na ait arazi görünümü (Işıkdere Mah., kuzeye doğru çekilmiştir) ve e) Işıkdere Plütunu'nun yakın görüntüsü.

#### 4.2. Petrografi

İncelenen Alemdar ve Işıkdere plütonlarını oluşturan kayaçların petrografik özellikleri incelenmiş ve çizelge 1’de verilmiştir. Yapılan modal analize dayalı KAP diyagramına (Streckeisen, 1976) aktarıldığında (Şekil 4), Alemdar Plütonu’nun kuvarşlı-monzodiyorit ve kuvarşlı diyorit bileşimli kayaçlardan, Işıkdere Plütonu’na ait kayaçların ise tonalit bileşimli kayaçlardan oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 4).

Alemdar ve Işıkdere Plütonları’nın petrografik incelemeleri ince-orta taneli, porfirik, monzonitik ve poikilitik dokuya (Şekil 5a-h) sahip olduklarını, ana mineral olarak plajiyoklaz, kuvars, K-feldispat, hornblend, biyotit ve manyetitten oluştuklarını ve bu minerallerin yanında apatit ve zirkon gibi tali mineraller de içerdiklerini göstermektedir.

Alemdar ve Işıkdere Plütonları’na ait kayaçlarda bulunan plajiyoklaz mineralleri, öz ve yarı öz şekilli kristaller şeklinde, kayaçta yaygın olarak (%57-69) çok iri fenokristaller ve/veya hamur içinde küçük kristaller şeklinde bulunmaktadır (Şekil 5). Bazı plajiyoklaz kristalleri, albit ikizlenmesi (Şekil 5a, d ve e) ve halkalı zonlanma (Şekil 5b, f) gösterirken, yer yer de elek dokusu göstermektedir (Şekil 5a, b). Özellikle bazı plajiyoklaz minerallerindeki ters zonlanmalar dengesiz kristallenmeye işaret etmektedir (Şekil 5a). Bazı plajiyoklazlar da kısmen serizitleşme ve killeşme mevcuttur (Şekil 5). İncelenen kayaçlarda



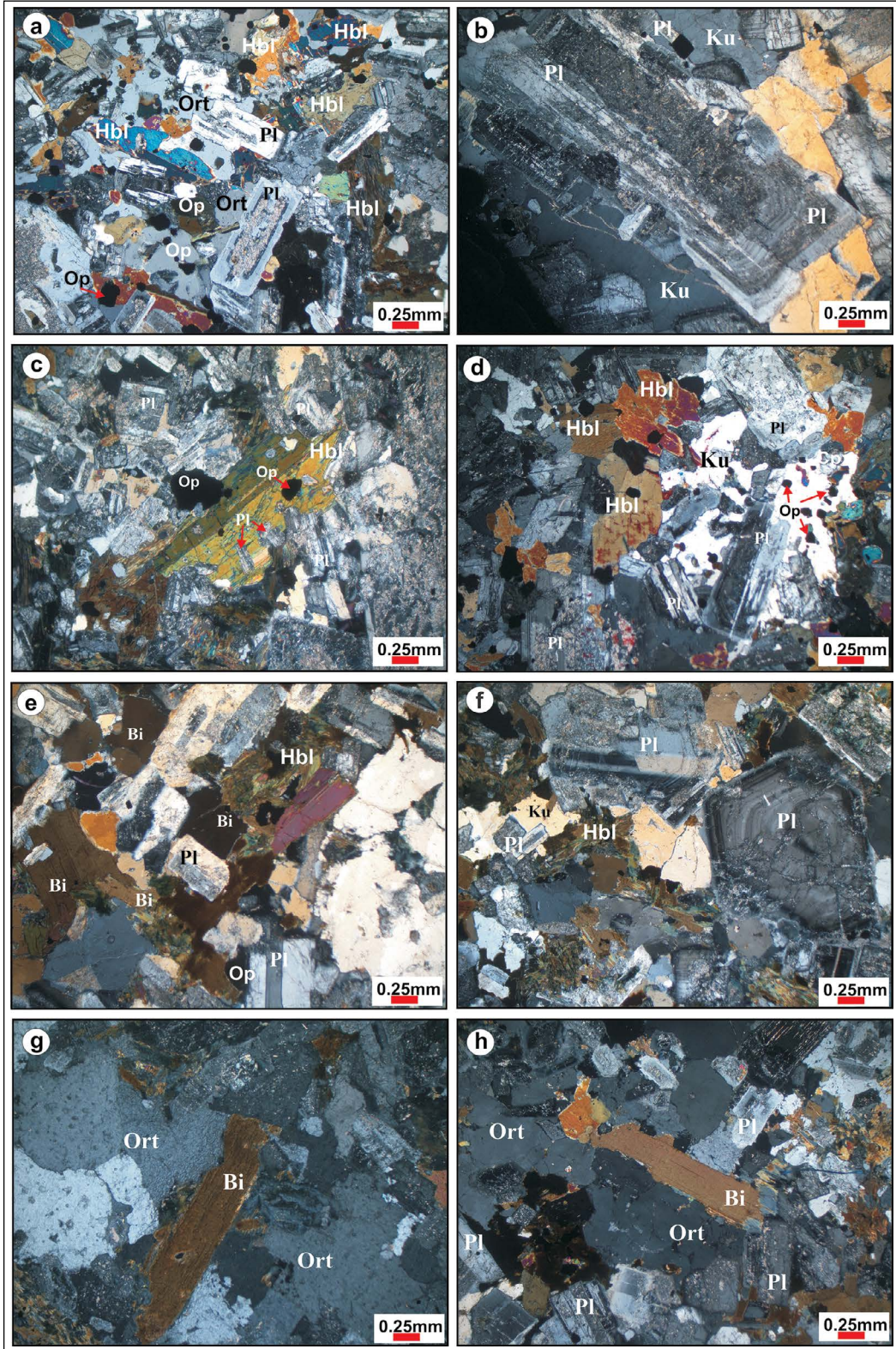
Şekil 4- Alemdar ve Işıkdere Plütonlarına ait kayaçların KAP diyagramındaki yerleri (Streckeisen, 1976). Alanlar; (1a) kuvarşolit, (1a) kuvarşca zengin granitoid, (2) alkali feldispat granit, (3) granit, (4) granodiyorit, (5) tonalit, (6\*) kuvarş alkali feldispat granit, (7\*) kuvarş siyenit, (8\*) kuvarş monzonit, (9\*) kuvarş monzodiyorit/ kuvarş monzogabro, (10\*) kuvarş diyorit/ kuvarş gabro/ kuvarş anortozit, (6) alkali feldispat siyenit, (7) siyenit, (8) monzonit, (9) monzodiyorit/ monzogabro, (10) diyorit/ gabro/ anortozit (Streckeisen, 1976).

K-feldispatlar %2-13 oranlarında olup, genellikle özşekilsiz kristaller olarak bulunurlar (Şekil 5a, g ve h). Genellikle karsbad ikizlenmesi ve poikilitik olarak hornblend, plajiyoklaz ve opak mineralleri içerirler (Şekil 5a, e). K-feldispatların gösterdiği poikilitik doku dengesiz kristallenmeyi ifade edebilir. Bazı

Çizelge 1- Alemdar ve Işıkdere Plütonlarının genel petrografik özellikleri ile modal bileşimleri.

Plüton	ALEMDAR (n= 13)			IŞIKDERE (n= 15)		
	Mak.	Min	Ort	Mak.	Min	Ort
Kayaç birimleri	kuvarşlı diyorit, kuvarşlı monzodiyorit			Tonalit		
Doku	taneli, porfirik, poikilitik, monzonitik, mirmekitik			taneli, porfirik, poikilitik, monzonitik, mirmekitik		
Tane Boyu	İnce-orta porfirik			İnce-orta-porfirik		
Modal min (%)	Mak.	Min	Ort	Mak.	Min	Ort
Plajiyoklaz	66,5	58,0	62,4	68,7	57,1	63,1
Kuvars	15,8	12,0	13,8	16,2	11,0	13,8
Ortoklaz	9,0	2,0	5,8	13,2	1,6	5,9
Hornblend	17,3	5,2	11,4	11,8	2,0	7,3
Biyotit	7,8	2,9	5,2	9,7	6,1	8,2
Opak mineraller	2,6	0,7	1,5	1,7	1,2	1,5
İkincil mineraller	4,1	2,2	3,2	5,2	1,1	3,4
Tali mineraller	3,1	1,3	2,4	2,5	1,0	1,5

n= örnek sayısı



Şekil 5- Alemdar Plütönu'na ait a) ortoklaz kristalinin plajiyoklaz içermeyle oluşan monzonitik doku, b) etrafı kuvars tarafından sarılmış ve plajiyoklaz kapanımları içeren iri zonlu plajiyoklaz kristali, c) opak mineral ve plajiyoklaz kapanımları içeren poikilitik dokuya sahip hornblend kristali, d) öz şekilli ve albit ikizlenmesi gösteren plajiyoklaz kristali, e) öz şekilli biyotit ve hornblend kristalleri; Işıkdere Plütönu'na ait f) zonlu doku gösteren plajiyoklaz kristalleri ve poikilitik doku gösteren kuvars kristali, g, h) öz şekilli biyotit kristalleri (Örnek No: A-1-1, I-4; Ç.N.; Pl: Plajiyoklaz, Hbl: Hornblend, Ort: Ortoklaz, Bi: Biyotit, Ku: Kuvars, Op: Opak mineral).

kesitlerde ortoklas mineralleri plajiyoklazların etrafını kısmen de olsa çevreleyerek monzonitik dokuyu oluşturmuştur (Şekil 5a). Bazı örnekler kırıklı ve kısmen killeşmiştir (Şekil 5e). Kuvarlar (%11-16), öz şekilsiz ve küçük kristaller halinde ve genellikle dalgalı sönme gösterirler (Şekil 5d). Hornblendler (%2-17) koyu kahverengi ve koyu yeşil renklere pleokroizmaya sahiptirler (Şekil 5c-f). Bazı kesitlerde iki yönlü dilinimi belirlenmiştir. Poikilitik hornblend mineralleri, plajiyoklaz ve opak mineralleri kapanım olarak içermeleri dengesiz kristallenmeye işaret edebilir (Şekil 5c). Biyotitler (%3-8) çubuğumsu veya yaprağımsı şekilde bulunurlar (Şekil 5e, g ve h). Biyotitler, (001) yüzeyine paralel dilinime ve açık-koyu kahverengi pleokroizmaya sahiptirler. Opak mineraller (%1-3), genellikle hornblend ve biyotit gibi mafik minerallerin çevresinde ve içinde kapanım olarak bulunurlar (Şekil 5a, c, d ve e).

#### 4.3 Mineral Kimyası

##### 4.3.1. Plajiyoklaz

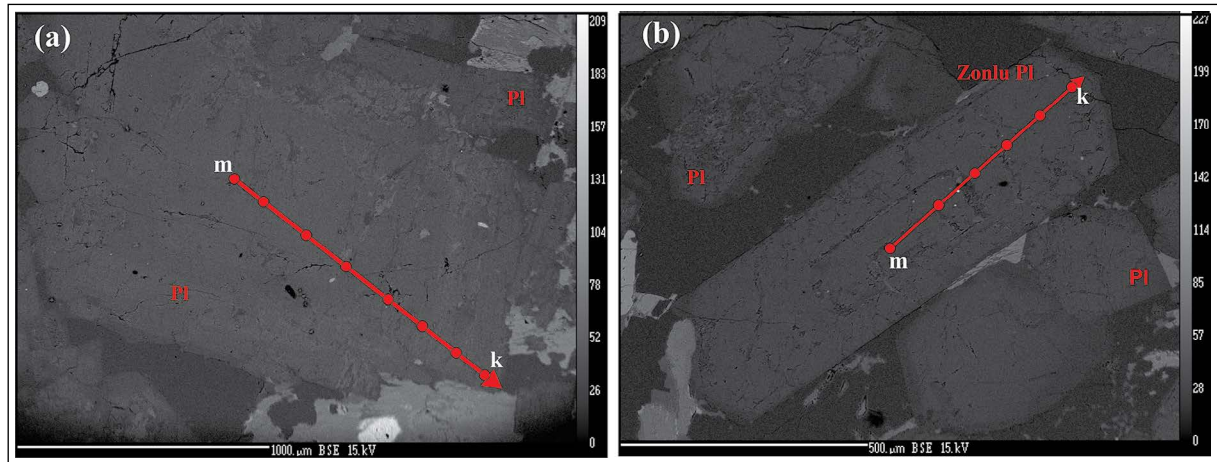
Alemdar ve Işıkdere plütonlarını oluşturan bütün kayalar türlerinde plajiyoklaza sıkça rastlanmıştır. Plajiyoklazlar 0,1-1 mm arasında değişen uzunluklarda öz şekilli kristaller olarak gözlenmektedir. Plütonları oluşturan kayalarda plajiyoklazlar hem ince hem de orta-iri kristaller şeklinde bulunmaktadırlar (Şekil 6a). Plajiyoklaz kristalleri yer yer halkalı (oscillatory) (Şekil 6a), normal ve ters zonlanma (Şekil 6b) göstermektedirler (Şekil 6). Alemdar Plütonu'nu

oluşturan plajiyoklazlar genellikle fenokristaller, mikrolit ve latalar halinde bulunmaktadır. Plajiyoklazların An içerikleri 92-05 arasında olup, andezinden anortite kadar değişmektedir (Şekil 7). Andezinlerin bileşimleri merkezde  $An_{42}Ab_{43}Or_{15}$  iken kenarda  $An_{33-49}Ab_{49-65}Or_{1-4}$  labradoritlerin bileşimleri merkezde  $An_{52-68}Ab_{30-47}Or_{0-4}$  iken kenarda  $An_{51-57}Ab_{42-49}Or_{0-2}$  bitovnitlerin bileşimi merkezde  $An_{70-79}Ab_{21-30}Or_{0-1}$  ve kenarda  $An_{71}Ab_{29}Or_1$  dir. Bir örnekte anortit  $An_{92}Ab_8Or_0$  bileşimine rastlanmıştır (Ek Çizelge 1, Şekil 7).

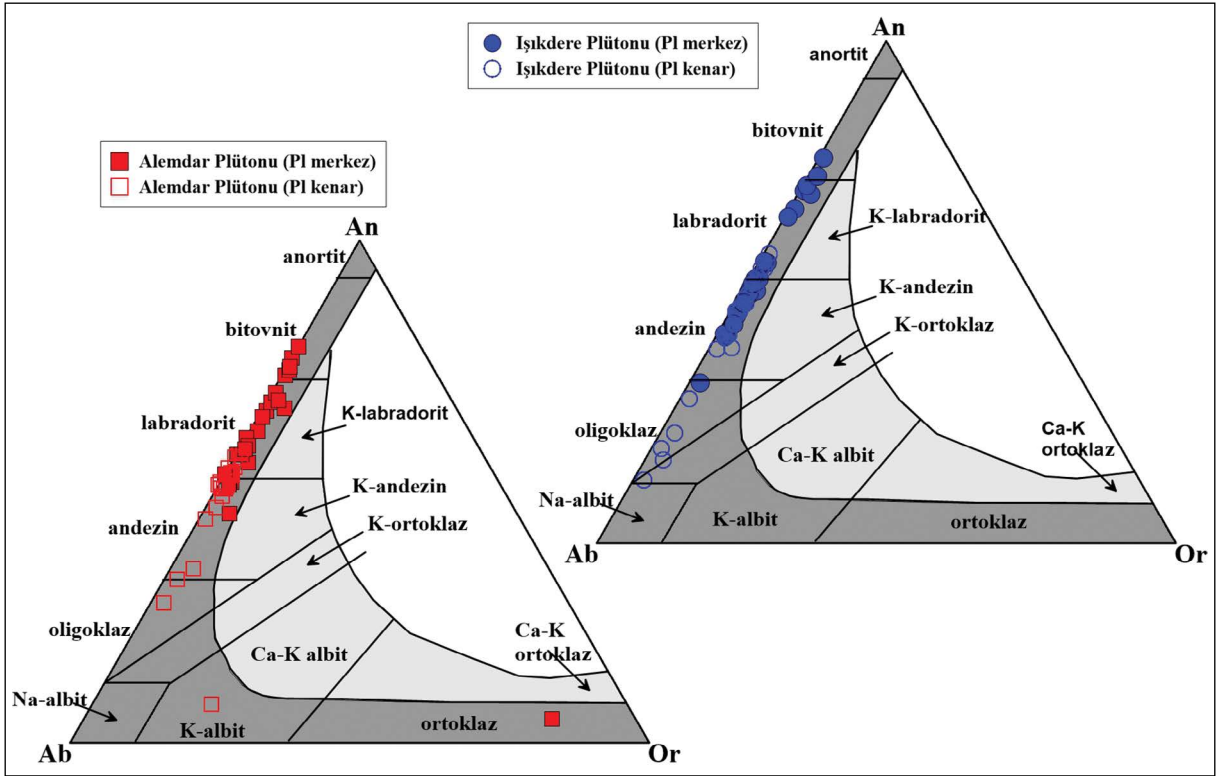
Işıkdere Plütonu'na ait plajiyoklazların bileşimi ( $An_{13-77}$ ) oligoklaztan bitovnite kadar değişmektedir (Şekil 7). Oligoklaz kristallerinin bileşimi merkezde  $An_{30}Ab_{71}Or_2$  kenarda  $An_{13-29}Ab_{76-86}Or_{2-3}$  andezinlerin bileşimi merkezde  $An_{32-50}Ab_{49-61}Or_{1-2}$  kenarda  $An_{36-49}Ab_{49-61}Or_{1-2}$  labradoritlerin bileşimi merkezde  $An_{50-69}Ab_{29-49}Or_{1-2}$  kenarda  $An_{51-58}Ab_{41-48}Or_{1-2}$  iken bitovnit bileşimleri merkezde  $An_{70-77}Ab_{23-29}Or_{1-2}$  kenarda  $An_{77}Ab_{23}Or_1$  değişmektedir.

##### 4.3.2. Hornblend

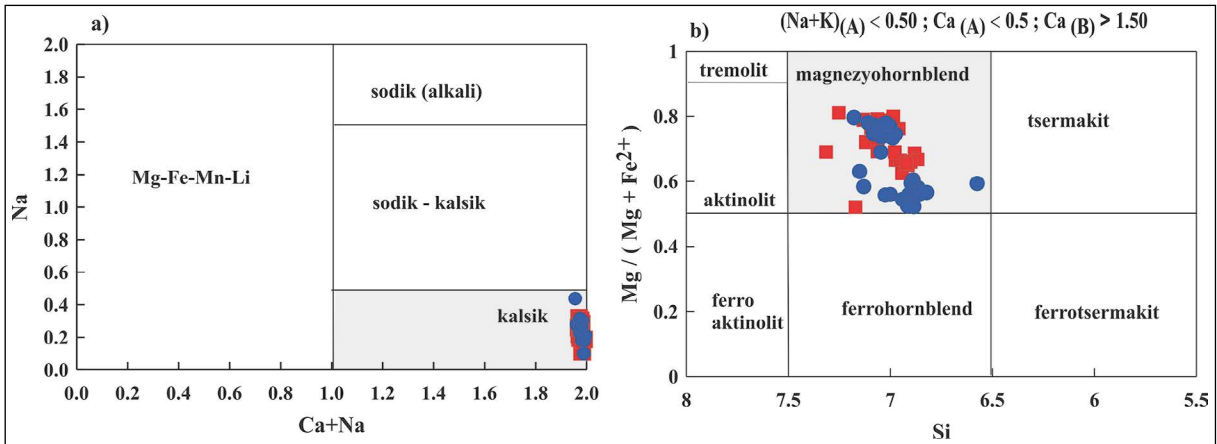
Alemdar ve Işıkdere plütonlarına ait hornblendler kalsik (Şekil 8a) olup, Leake vd. (1997)'ye göre magnezyo-hornblend olarak adlandırılmıştır (Şekil 8b). FeO Fe<sup>+2</sup> ve Fe<sup>+3</sup> ayrımı stokiometrik yöntem kullanılarak yapılmıştır Alemdar Plütonu'nda hornblendlerin Mg numaraları (Mg/(Mg+Fe<sup>+2</sup>)) 0,52-0,81 arasında değişirken, Işıkdere Plütonu'ndakilerde bu değerler 0,52-0,80 arasındadır (Ek Çizelge 2).



Şekil 6- Alemdar ve Işıkdere plütonlarına ait öz şekilli ve zonlu plajiyoklazların 'BSE (Back-scattered electron)' görüntüleri (Pl: Plajiyoklaz, m: merkez, k: kenar).



Şekil 7- Alemdar ve Işıkdere plütönlüğüne ait feldspatların Ab-An-Or üçgen diyagramındaki (Smith ve Brown, 1988) yerleri.



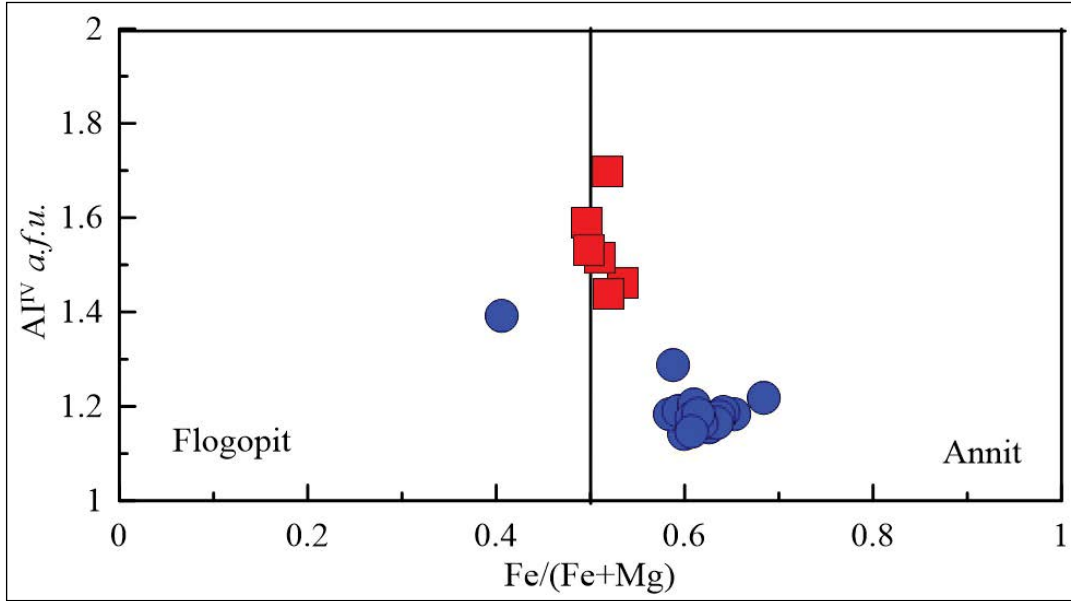
Şekil 8- Alemdar ve Işıkdere plütönlüğüne ait hornblendlerin sınıflama diyagramlarındaki (Leake vd., 1997) (Semboller şekil 7'deki gibidir) yerleri.

## 4.3.3. Biotit

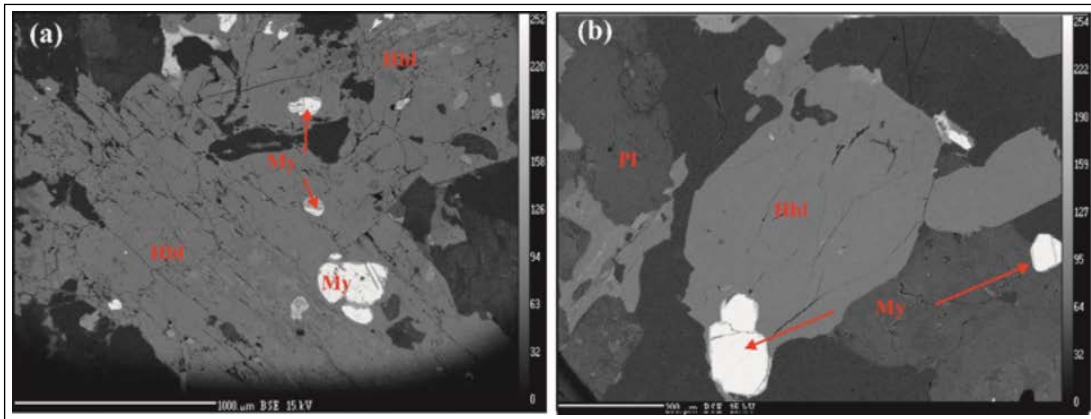
Alemdar Plütönu'na ait kayaç örneklerindeki koyu mikalar  $Fe^{top}/(Fe^{top}+Mg)$  karşı  $Al^{IV}(apfu)$  diyagramında biyotit alanına düşmekte olup,  $Mg/(Mg+Fe^{top})$  oranları 0,47-0,50 arasında değişmektedir (Şekil 9, Ek Çizelge 3). Işıkdere Plütönu'ndan alınan mikalar da aynı sınıflama diyagramında biyotit ( $Mg$  numarası, 0,32-0,67) alanına düşerken, sadece bir örnek  $Mg$ 'ca zengin biyotit alanına düşmektedir (Şekil 9, Ek Çizelge 3).

## 4.3.4. Fe-Ti oksitler

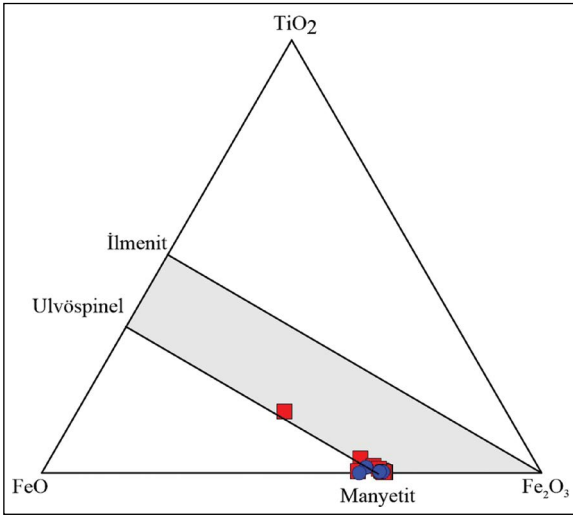
Alemdar ve Işıkdere plütönlarnını oluşturan kayaçlarda Fe-Ti oksit mineralleri genellikle hamur ve ferromagnezyen minerallerin içinde öz şekilsiz kapanımlar olarak bulunmaktadır. (Şekil 10). Fe-Ti oksitlerin tümü manyetit olarak adlandırılmıştır (Ek Çizelge 4, Şekil 11).



Şekil 9- İncelenen plütönik kayaçlardaki biyotitlerin sınıflama diyagramındaki (Speer, 1984) yerleri (Semboller şekil 7'deki gibidir).



Şekil 10- Alemdar ve Işıkdere plütönlarnını oluşturan kayaçlardaki Fe-Ti oksitlerin 'BSE (Back-scattered electron)' görünümüleri; (a ve b) Hamur ve hornblend kristalleri içinde kapanım halinde olan öz ve yarı öz şekilli manyetit kristalleri, (Örnek no: A-1-5 ve B-1; Hbl: Hornblend, Pl: Plajiyoklaz, My: Manyetit).



Şekil 11- İncelenen plütonlardaki Fe-Ti oksitlerin ayırman diyagramındaki (Bacon ve Hirschmann, 1988) yerleri (Semboller şekil 7'deki gibidir).

## 5. Tartışmalar

Magmanın sıcaklık (T), basınç (P) ve fugasite (oksijenin kısmi basıncı) değişimi, oluşacak mineralleri ve bu minerallerin denge durumlarını kontrol edecek en önemli etkenlerdir ve bu etkenlerin (T, P,  $fO$ , vs.) belirlenmesi magmanın kristallenme süreci hakkında bize önemli bilgiler verecektir. Termodinamik özellikler, bize sadece farklı koşullar altında hangi minerallerin oluşabileceğini tahmin etmemize olanak sağlamaz, aynı zamanda bir kayacın olduğu yerdeki koşulları belirlemede (termobarometre) mineral birlikteliklerini ve bileşimlerini kullanmamıza da imkân sağlar. Termodinamik hesaplamalarda hata sınırları, P-T tayinlerinin her aşamasındaki hataların ortaya çıkarılmasıyla belirlenebilir; bu hatalar, mineral bileşimlerinin analizlerinin yapılması aşamasında, termodinamik verilerin belirlenmesi ve kullanılması sırasında ve kalibrasyon yönteminin seçilmesi sürecinde yapılabilir. Termodinamik hesaplamalarda hata sınırları sıcaklıklar için genellikle  $\pm 30$ - $50^\circ\text{C}$ , basınçlar için  $\pm 1$ - $0,5$  kbar arasında değişebilir. Derinlik kayaçlarında termobarometrik hesaplamalar için kullanılacak mineral topluluklarının sınırlı olması basınç ve sıcaklık koşullarının belirlenmesini zorlaştırmaktadır.

Bu derinlik kayaçlarında bulunan mineral ve mineral toplulukları (hornblend, plajiyoklaz, biyotit, K-feldispat, kuvars, Fe-Ti oksitler) kullanılarak çeşitli termobarometrik hesaplamalar oluşturulmuştur.

Hornblend-plajiyoklaz (Holland ve Blundy, 1994), hornblend (Ridolfi vd., 2010; Ridolfi ve Renzulli, 2012) ve biyotit (Luhr vd., 1984) termometreleri, hornblend- $\text{Al}^{\text{IV}}$  (Hammarstrom ve Zen, 1986; Hollister vd., 1987; Johnson ve Rutherford, 1989; Schmidt, 1992) amfibol (Ridolfi vd., 2010; Ridolfi ve Renzulli, 2012) ve biyotit (Uchida vd., 2007) barometreleri çalışılan kayaçlar için kullanıma olanak sağlamıştır. Hornblend-Al barometresi ile elde edilen basınç değerleri jeoloji özellikler ve eş sokulum metamorfiklerden elde edilen basınçla uyumludur (Ague, 1997; Toksoy-Köksal, 2016). Magmanın oksidasyonu da mineral toplulukları ve mineral kimyası ile bulunabilir (Wones, 1989; Ridolfi vd., 2010; Ridolfi ve Renzulli, 2012). Yavaş soğuma nedeniyle granitik magmaların orijinal oksijen fugasitesi belirlenemediğinden sadece göreceli yaklaşımlar ve hesaplamalar yapılabilir (Kemp, 2004).

### 5.1. Plütonları Oluşturan Magmanın Kristallenme Koşulları

#### 5.1.1. Jeotermobarometre

Hornblend ve plajiyoklaz mineralleri kalk-alkalen magmatik kayaçlarda (plütonik ve volkanik) yaygın olarak birlikte bulunan mineral çiftleri oldukları için, birçok araştırmacı tarafından termobarometre için dikkate alınmış ve kullanılmıştır (Hammarstrom ve Zen 1986; Hollister vd., 1987; Johnson ve Rutherford, 1989; Blundy ve Holland, 1990; Schmidt, 1992; Holland ve Blundy, 1994). Çalışılan kütleler bu iki minerali bünyelerinde bulundurmaları açısından hesaplamalar için uygun bileşime sahiptir. Ancak, hornblend oluşumundan sonra sistemde aktinolite dönüşüm, kloritleşme, opak mineral oluşumları yaygın olacağından bu gibi alterasyona uğramış bileşimler özellikle hesaplamanın dışında tutulmalıdır (Hammarstrom ve Zen, 1986). Bununla birlikte, hornblend ve plajiyoklaz gibi minerallerin kimyasal bileşimlerinin artan sıcaklık ve basınç koşullarına göre değişim gösterdiği de bilinmektedir (Laird ve Albee, 1981; Hammarstrom ve Zen, 1986).

Sıcaklık (T) koşullarını belirleyebilmek amacıyla, özellikle kalk-alkali granitoidlerdeki hornblend-plajiyoklaz çiftlerinde geliştirilen jeotermometre için önerilen net-transfer değişim reaksiyonları (edenit-tremolit (edenit+4 kuvars = tremolit+albit) ve edenit-rişterit (edenit+albit = rişterit+anortit)) kullanılmıştır

(Holland ve Blundy, 1994). Anderson (1996)'ya göre edenit-rişterite dayalı termometre diğer magmatik termometrelere göre daha kullanışlı olup, tercih edilmelidir. Holland ve Blundy (1994) tarafından önerilen hornblend-plajiyoklaz termometresi kullanılarak < 5 kbar basınçta, Alemdar Plütönu'nda hesaplanan sıcaklık 754-931°C (ort. = 829°C) arasında iken Işıkdere Plütönu'nda hesaplanan 610-938°C (ort. = 811±16°C) arasında değişmektedir (Çizelge 2). Ayrıca, Ridolfi vd. (2010) göre hesaplanan basınçlar; Alemdar Plütönu için 0,6-1,1 kbar (ort. = 0,9±0,2), Işıkdere Plütönu için 0,7-1,1 kbar (ort. = 0,9±0,2) arasında (Çizelge 3), sıcaklıklar; Alemdar Plütönu için 741-814°C (ort. = 785±16), Işıkdere Plütönu için 764-816°C (ort. = 785±16) arasında (Çizelge 2) değişmektedir. Ridolfi ve Renzulli (2012) göre kristallenme basınçları Alemdar ve Işıkdere Plütönları

için sırasıyla 0,7-1,2 kbar (ort. = 0,9±0,3) ile 0,6-1,0 kbar (ort. = 0,9±0,2) arasındadır (Çizelge 3). Alemdar ve Işıkdere Plütönları için hesaplanan sıcaklık değerleri sırasıyla; 662-791°C (ort. = 757±38°C) ile 690-786°C (ort. = 756±28°C) arasında değişmektedir (Çizelge 2).

Alemdar ve Işıkdere plütönlarındaki biyotit minerallerinden (Luhr vd., 1984)'ne göre hesaplanan sıcaklıklar ve basınçlar (Uchida vd., 2007); Alemdar Plütönu için 541-741°C (ort. = 645±81°C) (Çizelge 2) ve 2,2-3,8 kbar (ort. = 2,8±0,6 kbar), Işıkdere Plütönu için 619-695°C (ort. = 674±18°C) ve 0,4-1,9 kbar (ort. = 0,8±0,4 kbar) arasında (Çizelge 3) değişmektedir.

Plütönik kayaçlarda bulunan hornblend minerallerindeki toplam alüminyum Al<sup>(0)</sup> basınç göstergesi olarak basınç hesaplamalarında

Çizelge 2- Plütönlara ait hornblend-plajiyoklaz (Holland ve Blundy, 1994), hornblend (Ridolfi vd. 2010; Ridolfi ve Renzulli, 2012) ve biyotit (Luhr vd., 1984) termometreleri kullanılarak hesaplanmış sıcaklık değerleri.

	T°C Holland ve Blundy (1994)	T°C Ridolfi vd. (2010)	T°C Ridolfi ve Renzulli (2012)	T°C Luhr vd. (1984)
<b>Alemdar Plütönu (n*)</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>6</b>
Min.	754	741	662	541
Mak.	931	814	791	741
Ort.	829	785±16	757±38	645
<b>Işıkdere Plütönu (n*)</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>16</b>
Min.	610	764	690	619
Mak.	938	816	786	695
Ort.	811±16	786±5	756±28	674

\* n: analiz sayısı

Çizelge 3- Plütönlara ait hornblend-Al, hornblend ve biyotit barometreleri kullanılarak hesaplanmış basınç değerleri.

	P1 (kbar) Hammarstrom ve Zen (1986)	P2 (kbar) Johnson ve Rutherford (1989)	P3 (kbar) Hollister vd. (1987)	P4 (kbar) Schmidt (1992)	P5 (kbar) Ridolfi vd. (2010)	P6 (kbar) Ridolfi ve Renzulli (2012)	P7 (kbar) Uchida vd. (2007)
<b>Alemdar Plütönu (n*)</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>6</b>
Min.	0,4	0,1	0,2	1,1	0,6	0,7	2,2
Mak.	2,3	2,2	1,7	2,9	1,1	1,2	3,8
Ort.	1,5 ± 0,4	1,4 ± 0,5	1,1 ± 0,4	2,2 ± 0,4	0,9 ± 0,2	0,9 ± 0,3	2,8
Ort. Derinlik (km)	5,7	5,0	4,2	8,0	3,3	3,3	10,3
<b>Işıkdere Plütönu (n*)</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>16</b>
Min.	0,8	0,5	0,5	1,4	0,7	0,6	0,4
Mak.	3,9	4,0	3,1	4,4	1,1	1,0	1,9
Ort.	1,7 ± 0,6	1,5 ± 0,7	1,2 ± 0,5	2,3 ± 0,6	0,9 ± 0,3	0,9 ± 0,2	0,8
Ort. Derinlik (km)	6,1	5,5	4,5	8,4	3,3	3,3	2,9

\* n: analiz sayısı, derinlik, kıtasal kabuk için 1kbar=3,7 km olarak alınmıştır ( Tulloch ve Callis, 2000).

kullanılmaktadır. Hesaplanan basınçlar hornblendlerin kristallenme derinliklerini yansıtabilmektedir. Alemdar Plütönu içinde yer alan hornblend minerallerinin Al<sup>0</sup> içeriği esas alınarak yapılan hesaplamalarda basınçlar (P); Hammarstrom ve Zen (1986)'ya göre 0,4-2,3 kbar (ort. = 1,5±0,4 kbar), Johnson ve Rutherford (1989)'a göre 0,1-2,2 kbar (ort. = 1,4±0,5 kbar), Hollister vd. (1987)'ye göre 0,2-1,7 kbar (ort. = 1,1±0,4 kbar), Schmidt (1992)'ye göre 1,1-2,9 kbar (ort. = 2,2±0,4 kbar) arasında değişmektedir (Çizelge 3).

Işıkdere Plütönu için yapılan basınç hesaplamaları sonucu elde edilen değerler ise; Hammarstrom ve Zen (1986)'ya göre 0,8-3,9 kbar (ort. = 1,7±0,6 kbar), Johnson ve Rutherford (1989)'a göre 0,5-4,0 kbar (ort. = 1,5±0,7 kbar), Hollister vd. (1987)'ye göre 0,5-3,1 kbar (ort. = 1,2±0,5 kbar), Schmidt (1992)'ye göre 1,4-4,4 kbar (ort. = 2,3±0,6 kbar) arasında değişmektedir (Çizelge 3).

Bu çalışmada kullanılan amfibol-plajiyoklaz ve amfibol barometreleri yaklaşık benzer değerler (0,1-3,1 kbar) verirken (Çizelge 3), biyotit barometresinden elde edilen değerler kısmen yüksek (0,4-3,8 kbar) sonuçlar vermiştir. Özellikle literatürde bu hornblend Al-barometresini kullanarak granitoidler için hesaplanan basınç değerlerinin jeolojik özellikler ve kütlelerin yerleşim derinlikleri ile uyumlu olduklarını belirleyen çalışmalar mevcuttur (Tulloch ve Challis, 2000). Bu çalışmada elde edilen nitel ve nicel veriler ışığında plütönlüğün yerleşim basınçları ~1-4 kbar arasına sınırlandırılmıştır. İncelenen plütönlükteki hornblendler kalsik hornblend, Al<sup>0</sup> değeri 2,0'dan düşüktür. Bu değer genellikle sığ derinlik sokulumlarına işaret etmektedir (Hammarstrom ve Zen, 1986; Kaygusuz vd. 2018). Buna ilaveten, plütönlüğün sığ sokulumlar olduklarını destekleyen porfiritik ve yeniden büyüme gibi dokusal özellikler de gözlenmiştir (Şekil 5).

Amfibol-plajiyoklaz gibi termometrelerin verdiği solidus sıcaklığı genelde >700°C'dir (Anderson, 1996). Plütönlükteki mineral birliktelikleri düşünülerek farklı termometrik yaklaşımlar kullanılarak makul bir kristallenme sıcaklık aralığı belirlenmeye çalışılmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi hornblend-plajiyoklaz (Holland ve Blundy, 1994) termometresi ile elde edilen değerler yüksek ve geniş sıcaklık aralığına (610-928°C) sahiptir (Çizelge

2). Bunun yanında kalk-alkalen volkanik kayalar ile kimyasal dengede olan kalsik hornblendler kullanılarak hazırlanan termometre hesaplamaları (Ridolfi vd., 2010; Ridolfi ve Renzulli, 2012) kısmen daha düşük sıcaklık (662-816°C) değerleri vermiştir. Hornblend temelli termometrik hesaplamalar yanında biyotit-Ti termometresi (Luhr vd., 1984) de kullanılmış ve düşük sıcaklık değerleri (541-741°C) elde edilmiştir (Çizelge 2). Biyotit termometresinden elde edilen düşük sıcaklık değerleri feldispatların soğuma sırasında sub-solidus kristal içi değişim ile yeniden dengelenmesini gösterir (Toksoy-Köksal, 2016). Ayrıca, geniş bir aralık veren hornblend-plajiyoklaz termometresi de yavaş soğuyan kayalarda geç evrede yeniden dengelenmenin varlığına işaret edebilir.

### 5.1.2. Oksijen Fugasitesi ve Su Miktarı

Magmatik kayaların kristallenme süreçlerindeki bir diğer önemli etmen ise oksijen fugasitesi ( $fO_2$ ) olup, oksijenin kısmi basıncı olarak tanımlanmaktadır. Oksijen fugasitesi, kayacı oluşturan ergiyiğin basınç-sıcaklık ilişkisini kontrol etmekle birlikte, kayacık oluşturu mineralerin duraylılık alanlarını da etkilemektedir. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişmekte olan bu değer, sıcaklık artışına bağlı olarak genellikle yükselmektedir (Wones, 1989; Ridolfi vd., 2010). Bununla birlikte kayacıkları oluşturan silikat ergiyiğinin içerdiği oksijen miktarı sıcaklığın kaynağı ve gazların karışım oranları ile kontrol edilmektedir.

Yavaş soğuma nedeniyle granitik magmaların orijinal oksijen fugasitesi belirlenemediğinden sadece göreceli yaklaşımlar ve hesaplamalarda bulunabilir (Wones, 1989; Anderson ve Smith, 1995; Kemp, 2004). İncelenen örneklerde Wones (1989)'a göre oksijen fugasitesi ( $\log_{10} fO_2$ ) değerleri Alemdar Plütönu için -20,0 ile -15,5 (ort. = -18,9), Işıkdere Plütönu için -19,7 ile -17,0 (ort. = -17,7) arasında değişmektedir (Çizelge 4). Hornblendlerin Mg indeksi dikkate alınarak Ridolfi vd. (2010)'a göre gerçekleştirilen hesaplamalarda ise -14,7 ile -11,8 ve -14,1 ile 11,9 arasındadır (Çizelge 4). Relatif oksijen fugasitesi ( $\Delta NNO$ ), sırasıyla 0,5-2,2 ile 0,6-2,1 arasında değişmektedir. Ridolfi ve Renzulli (2012)'ye göre hesaplanan ( $\Delta NNO$ ) değerleri -2,1 ile 0,3 arasında değişmektedir. Ridolfi vd. (2010) tarafından yapılan hidrometre hesaplamalarıyla ortalama su ( $H_2O$ ) içerikleri, Alemdar Plütönu için %4,4 ile 7,8 arasında iken, Işıkdere Plütönu için %4,5 ile 5,9 arasında değişmekteyken, Ridolfi ve Renzulli

Çizelge 4- Plütonlara ait hornblend ve biyotit mineralleri kullanılarak hesaplanmış oksijen fugasitesi ve su miktarı değerleri.

	Ridolfi vd. (2010)			Ridolfi ve Renzulli (2012)		Wones (1989)
	$\Delta\text{NNO}$	$f\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\Delta\text{NNO}$	$\text{H}_2\text{O}$	$f\text{O}_2$
<b>Alemdar Plütonu (n*)</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>6</b>
Min.	0,5	-14,7	4,4	-2,1	4,8	-23,0
Mak.	2,2	-11,8	7,8	0,3	7,3	-15,5
Ort.	1,6	-12,6	5,0	-0,4	5,3	-18,9
<b>Işıkdere Plütonu (n*)</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>16</b>
Min.	0,6	-14,1	4,5	-2,1	4,5	-19,7
Mak.	2,1	-11,9	5,9	0,3	5,8	-17,0
Ort.	1,3	-12,8	5,1	-0,9	5,1	-17,7

\* n: analiz sayısı

(2012)'ye göre ortalama su içerikleri Alemdar Plütonu için %4,8-7,3 iken Işıkdere Plütonu için 4,5-5,8 arasında değişen değerlere sahiptir (Çizelge 4).

Amfibol içeren magmaların su içeriği tartışmalı olup, Luhr vd. (1984)'ne göre %2-3, Egger (1972), Helz (1973) ve Naney (1983)'e göre ortalama %5, Merzbacher ve Egger (1984)'e göre ise ortalama %6 arasında değişim gösterirler. İncelenen örneklerde amfibollerden hesaplanan su içerikleri 4,4-7,8 arasındadır. Örneklerde sulu mafik mineraller (amfibol, biyotit), titanit ve apatit bulunması, magmanın yüksek su ve uçucu içeriğine işaret eder. Bu içerikteki yüksek sıcaklıklı magma tümüyle kristallenmeden kıtasal kabuğun sığ derinliklerine kadar yükselebilir (Helmy vd., 2004).

Sonuç olarak, mineral kimyası verilerinden yararlanarak yapılan termobarometrik hesaplamalara göre, incelenen kayalarda basınç değerleri 1-4 kbar arasında ve sıcaklık değerleri 541-938°C arasında değişmektedir. Tüm bu özellikler dikkate alındığında, incelenen plütonların sulu magmalardan itibaren orta-sığ derinliklere (4-15 km) yerleştiği ileri sürülebilir.

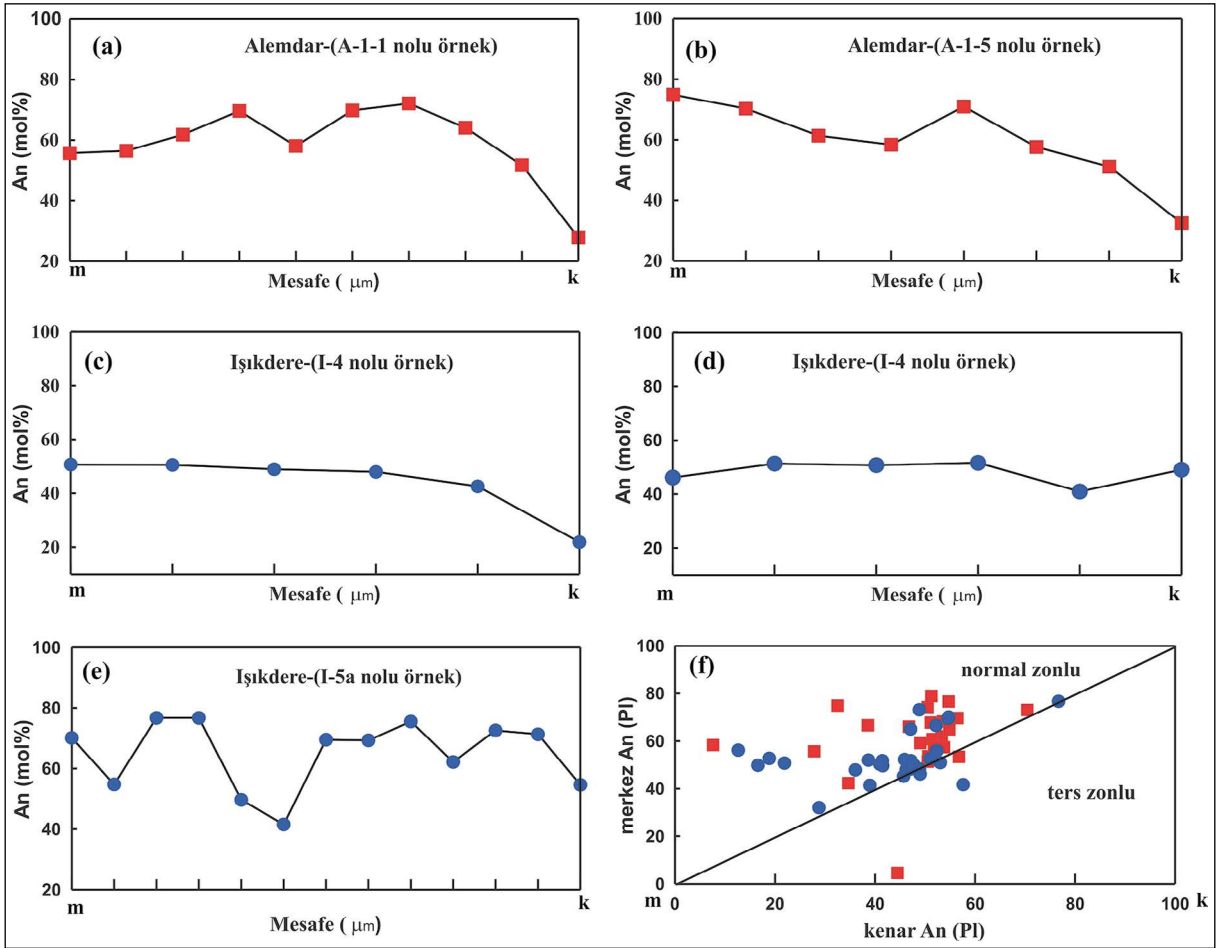
## 5.2. Dengesizlik Parametreleri

Minerallerin bileşimi ve kayalarda gözlemlenen dokusal özelliklerin magmatizmanın oluşumu sırasındaki dengesizlikler ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Magmanın sıcaklığının, basıncının ve bileşimsel olarak değişimini tetikleyen etkenler arasında soğuma, ani basınç azalımı ve/veya magma karışımı gösterilebilir. Bu etkenler sonucu dengedeki magmalar dengesiz konuma gelebilirler (Nixon 1988;

Rutherford ve Hill, 1993; Simonetti vd., 1996; Perugini vd., 2003). Plajiyoklaz kristallerinde gözlenen elek dokusu (Dungan ve Rhodes, 1978), normal ve elek dokulu plajiyoklazların aynı kayaç içerisinde bulunması (Stimac ve Pearce, 1992; Venezky ve Rutherford, 1997), yuvarlaklaşmış ve kemirilmiş mineraller (Stimac ve Pearce, 1992) dengesiz kristallenmeyi işaret eden dokusal özelliklerdir. Aynı örnekte yer alan minerallerde görülen hem normal hem de ters zonlanma bileşimsel ölçüt olarak kabul edilebilir (Sakuyama, 1981).

İncelenen magmatik kayalardaki dokusal, petrografik ve bileşimsel özellikler, dengesiz kristallenmeyi ifade eden plajiyoklazlarda gözlenen bileşimsel zonlanmalardır (Şekil 5b, f, 12). İncelenen kayalar içerisinde yer alan plajiyoklazlardaki halkalı zonlanmanın yanında yer yer gözlenen elek dokusu dengesizliği ifade eden diğer dokusal özellikler arasında sayılabilir (Şekil 5b, f). Özellikle bazı plajiyoklaz minerallerinde gözlenen ters zonlanmalar ile aynı örnek içerisinde gözlenen ters ve normal zonlu plajiyoklaz minerallerin bir arada bulunması dengesiz kristallenmeye işaret etmektedir (Şekil 12a-f). Ayrıca, K-feldispatlar poikilitik olarak hornblend, plajiyoklaz ve opak mineralleri içermekte olup, gözlenen bu dokusal özellik (Şekil 5a) dengesiz kristallenmeyi ifade eden bir diğer veri olarak ele alınabilir.

Plajiyoklazlardaki normal zonlanma fraksiyonel kristallenme ile açıklanırken, ters zonlanma için değişik görüşler hakimdir: (i) Suya doymuş şartlar altında sıcaklık ve basıncın artması (Blundy ve Cashman, 2001), (ii) Suya doymuş magmaların yükselimi sırasında sıcaklıktaki artış (Blundy vd.,



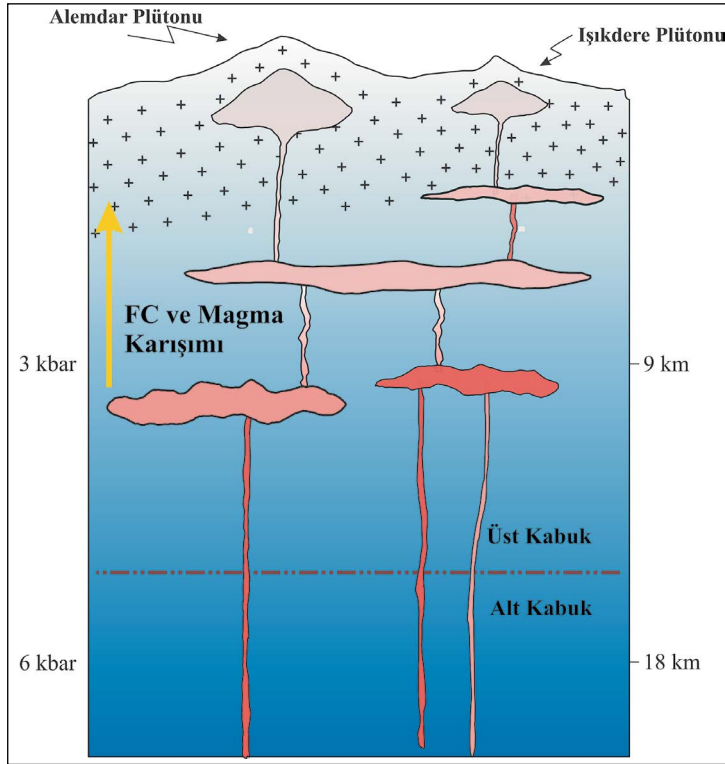
Şekil 12- Jura yaşlı Alemdar ve Işıkdere plütonları içerisinde yer alan (a-f) normal ve ters zonlu plajiyoklazların merkez-kenar An değişimi (m: merkez, k: kenar).

2006) ve (iii) magma odalarında meydana gelen tekrar karışım (back mixing) (Couch vd., 2001) ve magma odasının daha sıcak magmayla yenilenmesi (Streck, 2008) sonucunda sıcaklığın artmasıdır. İncelenen kayalardaki plajiyoklazların kenar An bileşimleri geniş bir aralıkta değişim ( $An_{8-77}$ ) göstermektedir. Aynı kayapta bulunan plajiyoklazların kenarlarında görülen bu tür bileşimsel değişimler magma karışımı nedeniyle komplek bir kökeni işaret edebilir (Wallace ve Carmichael, 1994).

### 5.3. Magmanın Kabuk İçerisindeki Gelişimi

Bölgede yapılan öncel çalışmalara göre özellikle Alt-Orta Jura yaşlı kayalar, güney yitimli Paleo-Tetisin okyanusal litosferinin dikleşerek geriye kıvrılması (roll back) sonucunda yay gerisinde meydana gelen ekstansiyonel ortamla ilişkili olduğu öne sürülmektedir

(Karlı vd., 2017). Yay gerisi ortamda meydana gelen ekstansiyonel genişleme astenosferik yükselmeye neden olmakta ve bu yükselmenin neden olduğu ısı akışı litosferik mantonun kısmi ergimesine ve Jura yaşlı kayaları oluşturan magmaların oluşumuna sebebiyet vermektedir. Yine tektonik genişlemeyle kabukta meydana gelen incelleme ve kırık sistemleri, oluşan bu ergiyiklerin kabuk içerisinde yukarı yönlü hareketine imkân sağlamaktadır. Petrografik ve mineral kimyası verileri; Jura kayalarını oluşturan magmaların polibarik kristallenme koşulları altında gelişen orta ve sığ derinliklerde iki farklı seviyedeki magma odasının varlığını göstermektedir. Minerallerden yapılan barometre hesaplama sonuçlarına göre (Çizelge 3), çalışma konusu kayaların yaklaşık 8-12 km'de magma odalarının varlığını göstermektedir (Şekil 13). Bu derinlikte hornblendlerin kristallenmesine ek olarak yüksek anortit içeriğine sahip plajiyoklazların



Şekil 13- Çalışılan kütlelerin kabuk içerisindeki gelişimlerini gösteren şematik kesit.

ve biyotitlerin kristallenmesi de gözlenmektedir. Daha sonra magma yükselmeye başlar ve yaklaşık 4-5 km derinlikte yer alan orta seviyedeki farklı magma odalarında depolanır (Şekil 13). Magma odalarında fraksiyonel kristallenmeye ek olarak elek dokusu, zonlanma gibi dokusal özelliklerle karakterize olan magma karışımı olaylarının oluşumu meydana gelir. Magma yükselimi tekrarlanır ve magma yaklaşık 2-3 km derinlikteki sıg magma odasında depolanır (Şekil 13). Bu magma odasının baskın mineralleri olan biyotit, düşük An içerikli plajiyoklaz, K-feldispatlar ve son olarak da kuvars nispeten düşük sıcaklıkta kristallenir. Oksijen fugasitesi tahminleri, bu seviye kristallenmenin oldukça yüksek oksidasyon koşulları altında gerçekleştiğini ifade eder. Nihayetinde fraksiyonlaşan magma sıg derinliklere yerleşerek soğur.

## 6. Sonuçlar

- Doğu Pontid Orojenik Kuşağı'nın güneyinde Gümüşhane yöresinde yüzeylenen Alemdar ve Işıkdere plütönlərini oluşturan kayalar ince-orta taneli olup, kuvars-diyorit, kuvarslı monzodiyorit ve tonalit bileşimindedir.

- Petrografik olarak incelenen plütönlər başlıca plajiyoklaz, hornblend, biyotit, K-feldispat, kuvars ve Fe-Ti oksit minerallerinden oluşmaktadır.
- İncelenen plütönlərini oluşturan kayalarda gözlenen plajiyoklazların halkalı zonlanması, elek dokusu ve aynı kayada görünen normal ve ters zonlu plajiyoklazların varlığı ile K-feldispatların poikilitik doku göstermesi gibi dokusal özellikler dengersiz kristallenmeyi işaret etmektedir.
- İncelenen plütönlərdə termobarometre hesaplamalarına göre; basınçlar 0,1-4,4 kbar arasında, sıcaklıklar 541-938°C arasında, oksijen fugasitesi değerleri -23 ile -12 arasında ve su içerikleri de % 4,4-7,8 arasındadır. Saha, petrografik ve termobarometrik tüm veriler dikkate alındığında, incelenen plütönlərin yerleşim derinliği orta-sıg kabuksal (~4-15 km) seviyelere karşılık gelmektedir.

## Katkı Belirtme

Bu çalışma, Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce (Proje No: 17.F5114.01.01) desteklenmiştir. Yazarlar, makaleye yapıcı eleştiri ve görüşleriyle katkı sağlayan İrfan Temizel ve Fatma Toksoy Köksal'a teşekkür eder.

## Ek Çizelgeler

Bu makalenin Ek Çizelgelerine elektronik ortamda [https://dergi.mta.gov.tr/documents/2307\\_162\\_ek\\_cizelgeler\\_emre\\_aydincakir.pdf](https://dergi.mta.gov.tr/documents/2307_162_ek_cizelgeler_emre_aydincakir.pdf) adresinden ulaşılabilir.

## Değinilen Belgeler

- Ague, J.J. 1997. Thermodynamic calculation of emplacement pressures for batholithic rocks, California: implications for the aluminum-inhornblende barometer. *Geology* 25, 563-566.
- Ağar, U. 1977. Demirözü (Bayburt) ve Köse (Kelkit) Bölgesinin Jeolojisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul (yayımlanmamış).
- Altherr, R., Topuz, G., Siebel, W., Şen, C., Meyer, H.P., Satır, M. 2008. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of Paleocene plagioclinites from the Eastern Pontides (NE Turkey). *Lithos* 105, 149-161.
- Anderson, J.L. 1996. Status of thermobarometry in granitic batholiths. *Trans Royal Society Edinburgh, Earth Sciences* 87, 125-138.
- Anderson, J.L., Smith, D.R. 1995. The effects of temperature and  $fO_2$  on the Al-inhornblende barometer. *American Mineralogist* 80, 549-559.
- Arslan, M., Aslan, Z. 2006. Mineralogy, petrography and whole-rock geochemistry of the Tertiary granitic intrusions in the eastern Pontides, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences* 27, 177-193.
- Arslan, M., Temizel, İ., Abdioğlu, E., Kolaylı, H., Yücel, C., Boztuğ, D., Şen, C. 2013.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating, whole-rock and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of post-collisional Eocene volcanic rocks in the southern part of the Eastern Pontides (NE Turkey): Implications for magma evolution in extension induced origin. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 166, 113-142.
- Aslan, Z. 2010. U-Pb zircon SHRIMP age, geochemical and petrographical characteristics of tuffs within calcalkaline Eocene volcanics around Gümüşhane (NE Turkey), Eastern Pontides. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen* 187, 329-346.
- Aslan, Z., Arslan, M., Temizel, İ., Kaygusuz, A. 2014. K-Ar dating, whole-rock and Sr-Nd isotope geochemistry of calc-alkaline volcanic rocks around the Gümüşhane area: implications for post-collisional volcanism in the Eastern Pontides, Northeast Turkey. *Mineralogy and Petrology* 108, 245-267.
- Aydın, F. 2014. Geochronology, geochemistry, and petrogenesis of the Maçka subvolcanic intrusions: implications for the late Cretaceous magmatic and geodynamic evolution of the eastern part of the Sakarya zone, northeastern Turkey. *International Geology Review* 56, 1246-1275.
- Aydın, F., Karşlı, O., Chen, B. 2008. Petrogenesis of the Neogene alkaline volcanics with implications for post collisional lithospheric thinning of the Eastern Pontides, NE Turkey. *Lithos* 104, 249-266.
- Aydınçakır, E. 2014. The Petrogenesis of Early-Eocene non adakitic volcanism in NE Turkey: Constraints on geodynamic implications. *Lithos* 208, 361-377.
- Aydınçakır, E. 2016. Subduction-related Late Cretaceous high-K volcanism in the Central Pontides orogenic belt: Constraints on geodynamic implications, *Geodinamica Acta* 28(4), 379-411.
- Aydınçakır, E. 2017. Taşhtayla (Çaykara, Trabzon, KD Türkiye) Civarı Geç Kretase Yaşlı Kalk-alkali Volkanik Kayaçların Petrografik ve Jeokimyasal Özellikleri. *GÜFBED* 7 (1), 71-78.
- Aydınçakır, E., Şen, C. 2013. Petrogenesis of the post collisional volcanic rocks from the Borçka (Artvin) area: Implications for the evolution of the Eocene magmatism in the Eastern Pontides. *Lithos* 172, 98-117.
- Bacon, C. R., Hirschmann, M. M. 1988. Mg/Mn partitioning as a test for equilibrium between coexisting Fe-Ti oxides. *American Mineralogist*, 73, 57-61.
- Blundy, J.D., Holland, T.J.B. 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 104, 208-224.
- Blundy, J., Cashman, K. 2001. Ascent driven crystallization of dacite magmas at Mount St. Helens, 1980-1986. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 140, 631-650.
- Blundy, J., Cashman, K., Humhreys, M. 2006. Magma heating by decompression-driven crystallization beneath andesite volcanoes. *Nature* 443, 76-80.
- Couch, S., Sparks, R.S.J., Carroll, M.R. 2001. Mineral disequilibrium in lavaş explained by convective self-mixing in open magma chambers. *Nature* 411, 1037-1039.
- Çimen, O., Göncüoğlu, M.C., Simonetti, A., Sayit, K. 2017. Whole rock geochemistry, zircon U-Pb

- and Hf isotope systematics of the Çangaldağ pluton: evidences for middle jurassic continental arc magmatism in the Central Pontides, Turkey. *Lithos* 290–291, 136–158.
- Çimen, O., Göncüoğlu, M.C., Simonetti, A., Sayit, K. 2018. New zircon U-Pb LA-ICP-MS ages and Hf isotope data from the Central Pontides (Turkey): Geological and geodynamic constraints. *Journal of Geodynamics* 116, 23–36.
- Çoğulu, E. 1975. Gümüşhane ve Rize Granitik Plütonların Mukayeseli Petrojeolojik ve Jeokronometrik Etüdü. Doçentlik Tezi, İTÜ. Maden Fakültesi, İstanbul (yayımlanmamış).
- Demir, Y. 2019. Geological, mineralogical and geochemical properties of the Dağbaşı skarn ores (Araklı-Trabzon, NE Turkey). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 158, 167-196.
- Dilek, Y. 2006. Collision tectonics of the Eastern Mediterranean region: Causes and consequences. *Geological Society of America Special Paper* 409, 1-13.
- Dokuz, A. 2011. Slab Detachment and Delamination Model for the Generation of Carboniferous High Potassium I-type Magmatism in the Eastern Pontides, NE Turkey: The Köse Composite Pluton. *Gondwana Research* 19, 926-944.
- Dokuz, A., Tanyolu, E. 2006. Geochemical constraints on the provenance, mineral sorting and subaerial weathering of lower Jurassic and upper Cretaceous clastic rocks from the Eastern Pontides, Yusufeli (Artvin), NE Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences* 15, 181-209.
- Dokuz, A., Karşlı, O., Chen, B., Uysal, İ. 2010. Sources and petrogenesis of Jurassic granitoids in the Yusufeli area, Northeastern Turkey: Implications for pre- and postcollisional lithospheric thinning of the Eastern Pontides. *Tectonophysics* 480, 259-279.
- Dokuz, A., Uysal, İ., Meisel, W., Turan, M., Duncan, R., Akçay, M. 2013. Post-collisional adakitic volcanism in the eastern part of the Sakarya Zone, Turkey: evidence for slab and crustal melting. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 166, 1443–1468.
- Dokuz, A., Külekçi, E., Aydınçakır, E., Kandemir, R., Alçiçek, M.C., Pecha, M.E., Sünnetçi, K. 2017a. Cordierite-bearing strongly peraluminous Cebre Rhyolite from the eastern Sakarya Zone, NE Turkey: Constraints on the Variscan Orogeny. *Lithos* 278–281, 285–302.
- Dokuz, A., Aydınçakır, E., Kandemir, R., Karşlı, O., Siebel, W., Derman, A.S., Turan, M. 2017b. Late Jurassic magmatism and stratigraphy in the eastern Sakarya Zone, Turkey: evidence for the slab breakoff of Paleotethyan oceanic lithosphere. *Journal of Geology* 125, 1–31.
- Dungan, M.A., Rhodes, J.M. 1978. Residual glasses and melt inclusions in basalts from DSDP Legs 45 and 46: evidence for magma mixing. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 67, 417–431.
- Eggler, D.H. 1972. Water-saturated and undersaturated melting relations in a Paricutin andesite and an estimate of water content in the natural magma. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 34, 261–271.
- Eyüboğlu, Y., Bektaş, O., Seren, A., Maden, N., Jacoby, W.R., Özer, R. 2006. Three axial extensional deformation and formation of the Liassic rift basins in the Eastern Pontides (NE Turkey). *Geologica Carpathica* 57 (5), 337-346.
- Eyüboğlu, Y., Dilek, Y., Bozkurt, E., Bektaş, O., Rojay, B., Şen, C. 2010. Structure and geochemistry of an Alaskan-type ultramafic–mafic complex in the Eastern Pontides, NE Turkey. *Gondwana Research* 18, 230–252.
- Eyüboğlu, Y., Dudas F.O., Santosh, M., Y.I.K., Kwon, S., Akaryalı, E. 2013. Petrogenesis and U-Pb zircon chronology of adakitic porphyries within the Kop ultramafic massif (Eastern Pontides Orogenic Belt, NE Turkey). *Gondwana Research* 24, 742–766.
- Eyüboğlu, Y., Dudas, F.O., Santosh, M., Xiao, Y., Yi, K., Chatterjee, N., Wu, F.Y., Bektaş, O. 2016. Where are the remnants of a Jurassic Ocean in the Eastern Mediterranean Region? *Gondwana Research* 33, 63–92.
- Eyüboğlu, Y., Dudas, F.O., Thorkelson, D., Zhu, D.C., Liu, Z., Chatterjee, N., Yi, K., Santosh, M. 2017. Eocene granitoids of northern Turkey: Polybaric magmatism in an evolving arc–slab window system, *Gondwana Research* 50, 311–345.
- Eyüboğlu, Y., Dudas, F.O., Zhu, D.C., Liu, Z., Chatterjee, N. 2019. Late Cretaceous I- and A-type magmas in eastern Turkey: Magmatic response to double-sided subduction of Paleo- and Neo-Tethyan lithospheres. *Lithos* 326, 39-70.
- Genç, Ş.C., Tüysüz, O. 2010. Tectonic setting of the Jurassic bimodal magmatism in the Sakarya Zone (Central and Western Pontides), northern Turkey: a geochemical and isotopic approach. *Lithos* 118, 95–111.
- Gülmez, F., Genç, Ş.C., Prelevic, D., Tüysüz, O., Karacik, Z., Roden, M.F., Billor, Z. 2016. Ultrapotassic volcanism from the waning stage of the Neotethyan subduction: a key study from the İzmir–Ankara–Erzincan Suture Belt, Central Northern Turkey. *Journal of Petrology* 57, 561–593.

- Güven, İ.H. 1993. Doğu Pontidler'in 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Hammarstrom, J.M., Zen, E. 1986. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist* 71, 1297–1313.
- Helmy, H.M., Ahmed, A.F., El Mahallawi, M.M., Ali, S.M. 2004. Pressure, temperature and oxygen fugacity conditions of calc-alkaline granitoids, Eastern Desert of Egypt and tectonic implications. *Journal of African Earth Sciences* 38, 255–268.
- Helz, R. T. 1973. Phase relations of basalts in their melting ranges at PH<sub>2</sub>O=5 kb as a function of oxygen fugacity. *Journal of Petrology* 14, 249–302.
- Holland, T.J.B., Blundy, J.D. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 116, 433-447.
- Hollister, L. S., Grisson, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H., Sisson, V.B. 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist* 72, 231–239.
- Johnson, M.C., Rutherford, M.J. 1989. Experimental calibration of the aluminium-in amphibole geobarometer with application to Long Valley Caldera (California) volcanic rocks. *Geology* 17, 837–841.
- Kandemir, R. 2004. Sedimentary characteristics and depositional conditions of Lower-Middle Jurassic Şenköy Formation in the around of Gümüşhane. Doktora Tezi, KTÜ, 274 s. Trabzon (yayımlanmamış).
- Kandemir, R., Yılmaz, C. 2009. Lithostratigraphy, facies, and deposition environment of the lower Jurassic Ammonitico Rosso type sediments (ARTS) in the Gümüşhane area, NE Turkey: Implications for the opening of the northern branch of the Neo-Tethys Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences* 34, 586-598.
- Kandemir, R., Lerosey-Aubril, R. 2011. First report of a trilobite in the Carboniferous of Eastern Pontides, NE Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences* 20, 179–183.
- Karlı, O., Chen, B., Aydın, F., Şen, C. 2007. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the Eocene Dölek and Sarıççek Plutons, Eastern Turkey: implications for magma interaction in the genesis of high-K calc-alkaline granitoids in a post-collision extensional setting. *Lithos* 98, 67-96.
- Karlı, O., Dokuz, A., Uysal, İ., Aydın, F., Bin, C., Kandemir, R., Wijbrans, R.J. 2010. Relative contributions of crust and mantle to generation of Campanian high-K calc-alkaline I-type granitoids in a subduction setting, with special reference to the Harşit pluton, Eastern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 160, 467–487.
- Karlı, O., Uysal, İ., Ketenci, M., Dokuz, A., Kandemir, R., Wijbrans, J. 2011. Adakite-like granitoid porphyries in the Eastern Turkey: potential parental melts and geodynamic implications. *Lithos* 127, 354-372.
- Karlı, O., Dokuz, A., Uysal, İ., Ketenci, M., Chen, B., Kandemir, R. 2012. Deciphering the shoshonitic monzonites with I-type characteristic, the Sıdağlı pluton, NE Turkey: magmatic response to continental lithospheric thinning. *Journal of Asian Earth Sciences* 51, 45-62.
- Karlı, O., Uysal, İ., Dilek, Y., Aydın, F., Kandemir, R. 2013. Geochemical modelling of early Eocene adakitic magmatism in the Eastern Pontides, NE Anatolia: continental crust or subducted oceanic slab origin? *International Geology Review* 55, 16, 2083-2095.
- Karlı, O., Dokuz, A., Kaliwoda, M., Uysal, İ., Aydın, F., Kandemir, R., Fehr, K.T., Wijbrans, R.J. 2014. Geochemical fingerprints of late Triassic calc-alkaline lamprophyres from the Eastern Pontides, NE Turkey: a key to understanding lamprophyre formation in a subduction-related environment. *Lithos* 196-197, 181-197.
- Karlı, O., Dokuz, A., Kandemir, R. 2016. Subduction-related late Carboniferous to early Permian magmatism in the eastern Pontides, the Camlik and Casurluk plutons: Insights from geochemistry, whole-rock Sr-Nd and in situ zircon Lu-Hf isotopes, and U-Pb geochronology. *Lithos* 266-267, 98-114.
- Karlı, O., Dokuz, A., Kandemir, R. 2017. Zircon Lu-Hf isotope systematics and U-Pb geochronology, whole-rock Sr-Nd isotopes and geochemistry of the early Jurassic Gokcedere pluton, Sakarya Zone-NE Turkey: a magmatic response to roll-back of the Paleo-Tethyan oceanic lithosphere. *Contributions to Mineralogy and Petrology* doi: 10.1007/s00410-017-1346-0
- Kaygusuz, A., Aydınçakır, E. 2009. Mineralogy, Whole Rock and Sr-Nd Isotope Geochemistry of Mafic Microgranular Enclaves in Cretaceous Dağbaşı Granitoids, Eastern Pontides, NE Turkey: Evidence of Magma Mixing, Mingling, and Chemical Equilibration. *Chemie der Erde/Geochemistry* 69, 247-277.
- Kaygusuz, A., Aydınçakır, E. 2011. Petrogenesis of a Late Cretaceous composite pluton from the eastern Pontides: the Dağbaşı pluton, NE Turkey. *Neues Jahrbuch Für Mineralogie* 188, 3, 211-233.
- Kaygusuz, A., Öztürk, M. 2015. Geochronology, geochemistry, and petrogenesis of the Eocene

- Bayburt intrusions, Eastern Pontide, NE Turkey: implications for lithospheric mantle and lower crustal sources in the high-K calc-alkaline magmatism. *Journal of Asian Earth Science* 108, 97–116.
- Kaygusuz, A., Siebel, W., Şen, C., Satir, M. 2008. Petrochemistry and petrology of I-type granitoids in an arc setting: the composite Torul pluton, Eastern Pontides, NE Turkey. *International Journal of Earth Sciences* 97, 739-764.
- Kaygusuz, A., Arslan, M., Wolfgang, S., Sipahi, F., İlbeli, N. 2012. Geochronological evidence and tectonic significance of Carboniferous magmatism in the southwest Trabzon area, eastern Pontides, Turkey. *International Geology Review* 54 (15), 1776–1800.
- Kaygusuz, A., Sipahi, F., İlbeli, N., Arslan, M., Chen, B., Aydınçakır, E. 2013. Petrogenesis of the Late Cretaceous Turnagöl intrusion in the eastern Pontides: Implications for magma genesis in the arc setting. *Geoscience Frontiers* 4, 423–438.
- Kaygusuz, A., Arslan, M., Sipahi, F., Temizel, İ. 2016. U-Pb zircon chronology and petrogenesis of Carboniferous plutons in the northern part of the Eastern Pontides, NE Turkey: constraints for Paleozoic magmatism and geodynamic evolution. *Gondwana Research* 39, 327–346.
- Kaygusuz, A., Yücel, C., Arslan, M., Sipahi, F., Temizel, İ., Çakmak, G., Güllüoğlu, Z.S. 2018. Petrography, mineral chemistry and crystallization conditions of Cenozoic plutonic rocks located to the North of Bayburt (Eastern Pontides, Turkey). *The Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 157, 77-104.
- Kemp, A.I.S. 2004. Petrology of high-Mg, low-Ti igneous rocks of the Glenelg River Complex (SE Australia) and the nature of their interaction with crustal melts. *Lithos* 78, 119-156.
- Laird, J., Albee, A.L. 1981. Pressure, temperature, and time indicators in mafic schist: their application to reconstructing the polymetamorphic history of Vermont. *American Journal of Science* 281, 127-175.
- Leake, E.B., Wooley, A.R., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W., Youzhi, G. 1997. Nomenclature of amphiboles report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *European Journal of Mineralogy* 9, 623–651.
- Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E., Varekamp, J.C. 1984. The 1982 eruptions of El Chicón Volcano, Chiapas, Mexico: Mineralogy and petrology of the anhydrite bearing pumices. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 23, 69–108.
- Merzbacher, C., Eggler, D.H. 1984. A magmatic geothermometer: application to Mount St. Helens and other dacitic magmas, *Geology* 12, 587–590.
- MTA, 2002. 1/500.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası, Samsun ve Trabzon Paftaları, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Naney, M.T. 1983. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems, *American Journal of Science* 283, 993–1033.
- Nixon, G.T. 1988. Petrology of the younger andesites and dacites of Iztaccihuatl volcano, Mexico: disequilibrium phenocryst assemblages as indicators of magma chamber processes. *Journal of Petrology* 29, 213–264.
- Okay, A.İ., Leven, E.J. 1996. Stratigraphy and paleontology of the upper Paleozoic sequences in the Pulur (Bayburt) region, Eastern Pontides. *Turkish Journal of Earth Sciences* 5, 145-155.
- Okay, A.İ., Şahintürk, Ö. 1997. Geology of the Eastern Pontides. In: Robinson, A.G. (ed.), *Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 68, 291-311.
- Okay, A.İ., Tüysüz, O. 1999. Tethyan sutures of northern Turkey. In: Durand, B., Jolivet, L., Hovarth, F., Séranne, M. (eds), *The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen Tethyan Sutures of Northern Turkey*. Geological Society London. Special Publications 156, 475-515.
- Okay, A.İ., Satir, M., Siebel, W. 2006. Pre-Alpide Palaeozoic and Mesozoic orogenic events in the Eastern Mediterranean region. In: Gee, D.G., Stephenson, R.A. (Eds.), *European Lithosphere Dynamics*. Geological Society, London, Memoirs 32, 389–405.
- Özdamar, Ş., Roden, M.F., Billor, M.Z. 2017. Petrology of the shoshonitic Çambaşı Pluton in NE Turkey and implications for the closure of the NeoTethys Ocean: insights from geochemistry, geochronology and Sr–Nd isotopes. *Lithos* 284 (285), 477–492.
- Pelin, S. 1977. Alucra (Giresun) Güneydoğu Yöresinin Petrol Olanakları Bakımından Jeolojik İncelenmesi. *KTÜ Yayınları*, 87, 103s, Trabzon (yayımlanmamış).
- Perugini, D., Busa, T., Poli, G., Nazzareni, S. 2003. The role of chaotic dynamics and flow fields in the development of disequilibrium textures in volcanic rocks. *Journal of Petrology* 44, 733–756.

- Ridolfi F., Renzulli, A. 2012. Calcic amphiboles in calcalkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130°C and 2.2 Gpa. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 163, 877–895.
- Ridolfi, F., Renzulli, A., Puerini, M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 160, 45–66.
- Rutherford, M.J., Hill, P.M. 1993. Magma ascent rates from amphibole breakdown: an experimental study applied to the 1980–1986 Mount St. Helens eruptions. *Journal of Geophysical Research* 98, 19667–19685.
- Sakuyama, M. 1981. Petrological study of the Myoko and Kurohime Volcanoes, Japan: crystallization sequence and evidence magma mixing. *Journal of Petrology* 22, 553–583.
- Saydam Eker, Ç., Sipahi, F., Kaygusuz, A. 2012. Trace and rare earth elements as indicators of provenance and depositional environments of Lias cherts in Gumushane, NE Turkey. *Chemie der Erde Geochemistry* 72, 167–177.
- Schmidt, M.W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in amphibole barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110, 304–310.
- Simonetti, A., Shore, M., Bell, K. 1996. Diopside phenocrysts from nephelinite lavas, Napak Volcano, Eastern Uganda: Evidence for magma mixing. *Canadian Mineralogist* 34, 411–442.
- Sipahi, F., Kaygusuz, A., Saydam Eker, Ç., Vural, A., Akpınar, İ. 2017. Late Cretaceous arc igneous activity: The Eğrikar Monzogranite example. *International Geology Review* 60 (3), 382–400.
- Smith, J.V., Brown, W.L. 1988. Feldspar minerals. 2nd review and extended edition Book (ISBN 0387176926), Springer-Verlag, Berlin.
- Speer, J. A. 1984. Micas in igneous rocks. In S. W. Bailey (Ed.), *Micas: Reviews in mineralogy and geochemistry* (Vol. 13, pp. 299–356). Washington, DC: Mineralogical Society of America.
- Stimac, J.A., Pearce, T.H. 1992. Textural evidence of mafic-felsic magma interaction in dacite lavas, Clear Lake, California. *American Mineralogist* 77, 795–809.
- Streck, M.J. 2008. Mineral textures and zoning as evidence for open system processes. In: Putirka KD, Tepley III FJ (eds) *Minerals, inclusions and volcanic processes*. *Miner Soc Am and Geochem Soc, Rev Mineral* 595–622
- Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Sciences Review* 12, 1–33.
- Şahin, S.Y., Güngör, Y., Boztaş, D. 2004. Comparative petrogenetic investigation of composite Kaçkar Batholith granitoids in eastern Pontide magmatic arc (Northern Turkey). *Earth Planets Space* 56, 429–446.
- Şen, C. 2007. Jurassic volcanism in the Eastern Pontides: Is it rift related or subduction related?. *Turkish Journal of Earth Sciences* 16, 523-539.
- Temizel, İ., Kurt, A. 2019. Geç Kretase yaşlı Bozat (Giresun, KD Türkiye) Plütönu'nun petrografik, jeokimyasal ve petrolojik Özellikleri. *GÜFBED* 9 (3), 454-472.
- Temizel, İ., Arslan, M., Ruffet, G., Peucat, J.J. 2012. Petrochemistry, geochronology and Sr–Nd isotopic systematics of the Tertiary collisional and post-collisional volcanic rocks from the Ulubey (Ordu) area, eastern Pontide, NE Turkey: implications for extension-related origin and mantle source characteristics. *Lithos* 128, 126-147.
- Temizel, İ., Abdioğlu-Yazar, Emel, Arslan, M., Kaygusuz, A., Aslan, Z. 2018. Mineral chemistry, whole-rock geochemistry and petrology of Eocene I-type shoshonitic plutons in the Gököy area (Ordu, NE Turkey). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 157, 123-155.
- Temizel, İ., Arslan, M., Yücel, C., Abdioğlu-Yazar, E., Kaygusuz, A., Aslan, Z. 2019a. U-Pb geochronology, bulk-rock geochemistry and petrology of Late Cretaceous syenitic plutons in the Gököy (Ordu) area (NE Turkey): Implications for magma generation in a continental arc extension triggered by slab roll-back. *Journal of Asian Earth Sciences* 171, 305-320.
- Temizel, İ., Arslan, M., Yücel, C., Abdioğlu-Yazar, E., Kaygusuz, A., Aslan, Z. 2019b. Eocene tonalite-granodiorite from the Havza (Samsun) area, northern Turkey: adakite-like melts of lithospheric mantle and crust generated in a post-collisional setting. *International Geology Review* doi.org/10.1080/00206814.2019.1625077.
- Toksoy-Köksal, F. 2016. Ekecikdağ Magmatik Birliği (Orta Anadolu) Granitoidlerinin Petrojenezini: Mineral Kimyası Perspektifi. *Yerbilimleri* 37(2), 139-178.
- Topuz, G., Altherr, R., Kalt, A., Satir, M., Werner, O., Schwarz, W.H. 2004. Aluminous granulites from the Pulur Complex, NE Turkey: a case of partial melting, efficient melt extraction and crystallization. *Lithos* 72, 183–207.
- Topuz, G., Altherr, R., Schwarz, W.H., Dokuz, A., Meyer, H. P. 2007. Variscan amphibolite-facies rocks from the Kurtuluş metamorphic complex: Gümüşhane area, Eastern Pontides, Turkey. *International Journal of Earth Sciences* 96, 861-873.

- Topuz, G., Altherr, R., Siebel, W., Schwarz, W.H., Zack, T., Hasözbeç, A., Barth, M., Satır, M., Şen, C. 2010. Carboniferous high-potassium I-type granitoid magmatism in the Eastern Pontides: the Gümüşhane Pluton (NE Turkey). *Lithos* 116, 92–110.
- Topuz, G., Okay, A.İ., Altherr, R., Schwarz, W.H., Siebel, W., Zack, T., Satır, M., Şen, C. 2011. Post-collisional adakite-like magmatism in the Ağvanis Massif and implications for the evolution of the Eocene magmatism in the Eastern Pontides (NE Turkey). *Lithos* 125, 131-150.
- Tulloch, A.J., Challis, G.A. 2000. Emplacement depths of Paleozoic–Mesozoic plutons from western New Zealand estimated by hornblende-Al geobarometry. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 43, 555-567.
- Uchida, E., Endo, S., Makino, M. 2007. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits. *Resource Geology* 57, 47–56.
- Ustaömer, T., Robertson, A.H.F. 2010. Late Palaeozoic Early Cenozoic tectonic development of the Eastern Pontides (Artvin area), Turkey: stages of closure of Tethys along the southern margin of Eurasia. *Geological Society, London. Special Publications* 340, 281-327.
- Venezky, D.Y., Rutherford, M.J. 1997. Preeruption conditions and timing of dacite–andesite magma mixing in the 2.2 ka eruption at Mount Rainier. *J Geophys Res* 102, 20069–20086.
- Wallace, P.J., Carmichael, I.S.E. 1994. Petrology of Volcan Tequila, Jalisco, Mexico: disequilibrium phenocryst assemblages and evolution of the subvolcanic magma system. *Contrib Mineral Petrol* 117, 345–361.
- Wones, D.R. 1989. Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks. *American Mineralogist* 74, 744–749.
- Yılmaz, S., Boztuğ, D. 1996. Space and time relations of three plutonic phases in the Eastern Pontides (Turkey). *International Geology Review* 38, 935–956.
- Yılmaz, Y. 1972. Petrology and structure of the Gümüşhane granite and surrounding rocks. NE Anatolia. PhD Thesis, Universty of London, 260s.
- Yılmaz, Y., Tüysüz, O., Yiğitbaş, E., Genç, Ş.C., Şengör, A.M.C. 1997. Geology and tectonics of the Pontides. in Robinson, A.G. (eds.), *Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 68, 183-226.
- Yücel, C. 2017. Akçaabat (Trabzon) Güneyi ve Çevresindeki Kampaniyen Yaşlı Volkanik Kayaçların Petrografisi, Jeokimyası, Jeokronolojisi ve Petrojenezi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 7 (1), 79-101.
- Yücel, C., Arslan, M., Temizel, İ., Abdioğlu, E. 2014. Volcanic facies and mineral chemistry of Tertiary volcanics in the northern part of the Eastern Pontides, northeast Turkey: Implications for pre eruptive crystallization conditions and magma chamber processes. *Mineralogy and Petrology* 108, 439-467.
- Yücel, C., Arslan, M., Temizel, İ., Abdioğlu, E., Ruffet, G. 2017. Evolution of K-rich magmas derived from a net veined lithospheric mantle in an ongoing extensional setting: Geochronology and geochemistry of Eocene and Miocene volcanic rocks from Eastern Pontides (Turkey). *Gondwana Research* 45, 65-86.