



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>



Orta Eosen Kazıkbeli Plütünü'nün (Doğu Pontidleri, KD Türkiye) mineral kimyası, petrografisi ve kristalleşme koşulları

Mineral chemistry, petrography and crystallization conditions of the Middle Eocene Kazıkbeli Pluton (Eastern Pontides, NE Türkiye)

Zikrullah Samet GÜLOĞLU^{a*}, Abdullah KAYGUSUZ^b, Emre AYDINÇAKIR^b ve Cem YÜCEL^c

^a Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Zonguldak, Türkiye

^b Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

^c Gümüşhane Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:
Petrografi,
Mineral Kimyası,
Jeotermobarometre,
Kürtün (KD Türkiye),
Doğu Pontidleri.

ÖZ

Doğu Pontidler, geniş bir yaş ve bileşim yelpazesine yayılan çeşitli plütonik kayalara ev sahipliği yapmaktadır. Bu kayalar arasında Gümüşhane'nin Kürtün ilçesinde bulunan Orta Eosen Kazıkbeli plütünü, kendine özgü petrolojik özellikleri sebebiyle öne çıkmaktadır. Bu çalışma, petrografik ve mineral kimyasal verilerin petrografik etkilerini çözerek Kazıkbeli magmasının kristalleştiği ve oluştuğu fizikokimyasal koşulları (sıcaklık, basınç, oksijen fugasitesi) belirlemeyi amaçlamaktadır. Bununla birlikte, mineral kimyasal verileri entegre ederek, oluşum basıncını, kristalleşme sıcaklığını ve oksijen fugasitesini nicel olarak değerlendirmeyi hedeflenmektedir. Doğu Pontidleri'nin jeolojik evriminin aydınlatılması için Kazıkbeli plütön kayalarının jeolojik, petrografik ve mineral kimyası ile belirlenen genetik ilişkileri ve fizikokimyasal özelliklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması çok önemlidir. Kazıkbeli Plütünü, baskın olarak KD-GB yönelimine sahip olup yaklaşık 46 km²'lik bir alanı kapsamaktadır. Modal mineralojik analizi, gabroyik diyoritten monzogranite kadar uzanan bir bileşim spektrumunu ortaya koymaktadır ve granodiyorit ve tonalit en belirgin kayaç türleri olarak öne çıkmaktadır. Dokusal varyasyonlar ince ila orta taneli, porfirik, poikilitik ve bazen de grafik dokuları kapsamaktadır. Plütönün birincil mineral bileşimi plajiyoklaz, ortoklaz, kuvars, amfibol, biyotit ve Fe-Ti oksitlerinden oluşur. Aksesuar mineraller arasında zirkon, apatit, sfen ve allanit bulunur. Plajiyoklazlar labradorit ile oligoklaz (An₂₆ ile An₆₆) bileşimindedir. K-feldispat mineralleri ortoklaz bileşimi sergilemiştir (Or₈₀ ila Or₉₇). Tüm amfiboller kalsik amfibol alanına aittir ve magnezyum hornblend (Mg#=0,63-0,73) bileşimi sergiler. Biyotitler annit ve flogopit uç bileşenleri arasında bir kompozisyona sahip katılmış eriyik ürünler olarak kristalleşmiştir ve flogopit katı çözüm serisinin magnezyum zengini (Mg#=0,52-0,58) uç noktasına yakın bir noktada yer almaktadır. Amfibol ve biyotit verilerinden elde edilen hesaplanmış kristalleşme sıcaklıkları 712°C ila 824°C arasında değişmektedir. Amfibol plajiyoklaz, amfibol ve biyotit kullanılarak hesaplanan basınç tahminleri 0,04 ila 2,06 kbar aralığını göstermektedir. Amfibol ve biyotit kullanılarak hesaplanan oksijen fugasitesi (fO₂) değeri 12,5 ile -16,1 arasındadır. Plütönün amfibol bazlı su içeriği tahminleri ise %3,7 ila %5,7 aralığındadır. İncelenen Kazıkbeli Plütönü kayaçlarının içindeki biyotit bileşimleri, potansiyel bir manto kökenine işaret edebilecek özellikleri sergilemektedir. Jeolojik ve petrografik özellikler ile mineral kimyası verilerine dayanan jeobarometrik hesaplamalar, Kazıkbeli Plütönü'nün kabuk içinde nispeten sığ derinliklerde (1 ila 8 km) yerleştiğini göstermektedir.

Geliş Tarihi: 26.01.2024

Kabul Tarihi: 07.08.2024

*Başvurulacak yazar: Zikrullah Samet GÜLOĞLU, sametguloglu610@gmail.com

Keywords:

Petrography,
Mineral Chemistry,
Geothermobarometer,
Kürtün (NE Türkiye),
Eastern Pontides.

ABSTRACT

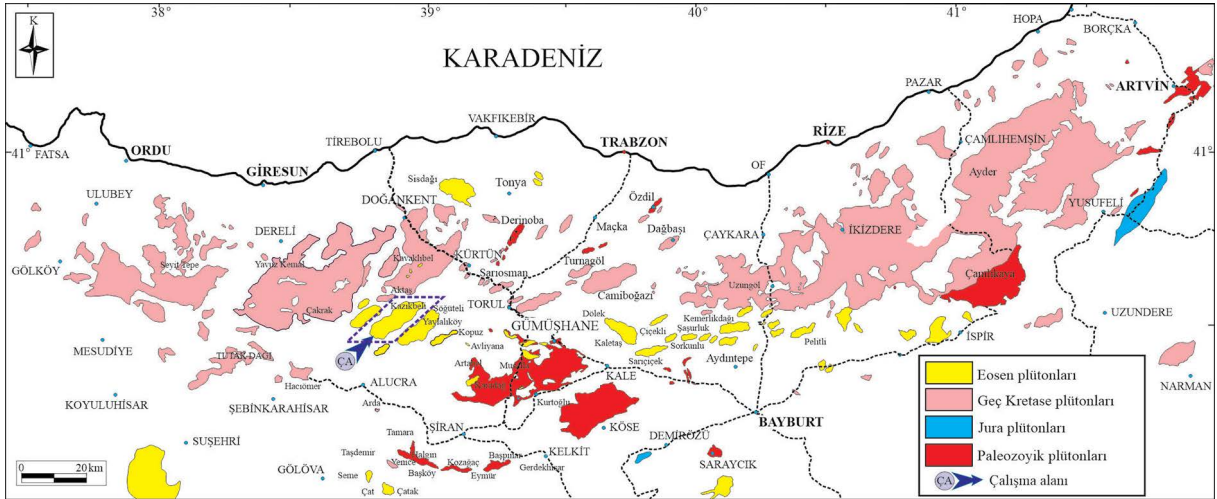
The Eastern Pontides host a diverse suite of plutonic rocks spanning a wide range of ages and compositions. Among these, the Middle Eocene Kazıkbeli pluton, located in the Kürtün district of Gümüşhane, stands out due to its distinctive petrological characteristics. This study aims to unravel the petrological implications of petrographic and mineral chemical data to determine the physicochemical conditions (temperature, pressure, oxygen fugacity) under which the Kazıkbeli magma crystallized and was emplaced. By integrating mineral chemical data, we seek to quantify emplacement pressure, crystallization temperature, and oxygen fugacity. A comprehensive understanding of the genetic relationships and physicochemical properties of the Kazıkbeli pluton rocks, as determined through geological, petrographic and mineral chemistry, is crucial for elucidating the geological evolution of the Eastern Pontides. The Kazıkbeli Pluton exhibits a predominant NE-SW orientation and encompasses an area of roughly 46 km². Modal mineralogical analysis reveals a compositional spectrum ranging from gabbroic diorite to monzogranite, with granodiorite and tonalite being the most prominent rock types. Textural variations encompass fine- to medium-grained, porphyritic, poikilitic, and occasionally graphic textures. The primary mineral assemblage of the pluton comprises plagioclase, orthoclase, quartz, amphibole, biotite, and Fe-Ti oxides. Accessory minerals include zircon, apatite, sphene, and allanite. Plagioclases are labradorite to oligoclase (An₂₆ to An₆₀) in composition. K-feldspar minerals exhibited an orthoclase composition (Or₈₀ to Or₉₀). All amphiboles belong to the calcic amphibole field and exhibit a magnesio-hornblende (Mg#=0.63-0.73) composition. Biotites crystallized as solidified melt products with compositions between annite and phlogopite endmembers, plotting close to the magnesium-rich (Mg#=0.52-0.58) end of the phlogopite solid solution series. Calculated crystallization temperatures derived from amphibole and biotite data range from 712°C to 824°C. Pressure estimations calculated using amphibole-plagioclase, amphibole and biotite suggest a range of 0.04 to 2.06 kbar. Oxygen fugacity (fO₂) values calculated using amphibole and biotite fall between -12.5 and -16.1. Amphibole-based water content estimations indicate a range of 3.7% to 5.7% for the pluton. Biotite compositions within the studied Kazıkbeli pluton rocks exhibit characteristics suggestive of a potential mantle origin. Geobarometric calculations based on mineral chemistry data with geological and petrographic features indicate the emplacement of the Kazıkbeli Pluton at relatively shallow depths within the crust (~1 to 8 km).

1. Giriş

Doğu Pontid Orojenik Kuşağı (EPOB), plütonik ve volkanik litolojilerin incelenmesi için kritik bir alanı kapsamaktadır (Okay ve Şahintürk, 1997; Kaygusuz ve Şahin, 2016; Özdamar, 2016; Temizel vd., 2019; Gücer ve Sarı, 2021; Arslan vd., 2022; Kaygusuz vd., 2022, 2023; Oğuz-Saka vd., 2023; Sarı vd., 2023; Revan vd., 2023; Rezeau vd., 2023). EPOB, Karbonifer'den Eosen'e kadar uzanan yerleşim yaşına sahip zengin bir plütonik yapı dokusunu sergilemektedir (Şekil 1). Bu plütonlar belirgin bir şekilde gabrodan granite kadar uzanan bir bileşim spektrumunu göstermektedir (Şekil 1). İleri analizler, EPOB içinde dört farklı intrüzif dönem olduğunu ortaya koymaktadır: Paleozoik (Karbonifer), Jura, Geç Kretase ve Eosen (Şekil 1). Paleozoik plütonlar, metamorfik kayaçların içine yerleşmiştir (Yılmaz, 1972; Çoğulu, 1975; Topuz vd., 2010; Dokuz, 2011;

Kaygusuz vd., 2012, 2016; Ustaömer vd., 2013; Gücer ve Sarı, 2021), Jura plütonları, Jura öncesi temel kayaçlarının içine yerleşmiştir (Eyüboğlu vd., 2016; Karlı vd., 2017; Dokuz ve Sünnetçi, 2019; Aydınçakır vd., 2020, 2023), Geç Kretase plütonları, dalma batma ile ilişkili volkanik ve/veya volkanoklastik kayaçları kesmektedir (Kaygusuz, 2000; Boztuğ vd., 2006; İlbeyli, 2008; Kaygusuz vd., 2008, 2021; Liu vd., 2018; Eyüboğlu vd., 2019; Temizel vd., 2019, 2022; Yücel vd., 2023) ve Eosen plütonları da tüm önceki birimlerin içine yerleşmiştir (Topuz vd., 2005, 2011; Karlı vd., 2007, 2011; Kaygusuz ve Öztürk, 2015; Eyüboğlu vd., 2017, 2018; Kaygusuz vd., 2017, 2018, 2020; Özdamar vd., 2017; Sipahi vd., 2017; Temizel vd., 2018, 2020; Vural ve Kaygusuz, 2021; Aydınçakır vd., 2022).

Mineral bileşimi ve bileşen minerallerin jeokimyasal imzası ile gözlemlenen eriyiğin evrimi,



Şekil 1- İncelenen Kazıkbeli Plütönu'nun konumu ve Doğu Pontidleri'ndeki plütönik kayaların dağılımı (Güven, 1993 ve Güloğlu, 2022'den alınıp değiştirilmiştir).

magmatik kayalarda içsel olarak bağlantılıdır (Abbott, 1985). Sıcaklık (T), basınç (P) ve oksijen fugasitesindeki (fO_2) değişimler, magma içinde mineral oluşumu ve kararlılığını kontrol eden başlıca faktörler olarak kabul edilmektedir. Bu yoğun değişkenlerin (T, P, fO_2) belirlenmesi, magma evrimini yöneten kristalleşme süreçleri hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Termodinamik ilkeler, belirli koşullar altında kristalleşen mineralojik bileşenleri tahmin etmemizi sağlar. Önceki çalışmalar bazı Doğu Pontid plütönlüklerinin yerleşim koşullarını ele almış olsa da (örneğin, Karlı vd., 2007; Eyüboğlu vd., 2017; Kaygusuz vd., 2018, 2020; Temizel vd., 2018; Aydınçakır vd., 2020), Kazıkbeli plütönu bu bağlamda incelenmemiştir. Bu nedenle bu araştırma kristalleşme ortamı hakkında yeni tahminler sunarak Kazıkbeli Plütönu'nun basınç ve sıcaklık geçmişi aydınlatmaya yönelik ilk girişimi sağlamaktadır.

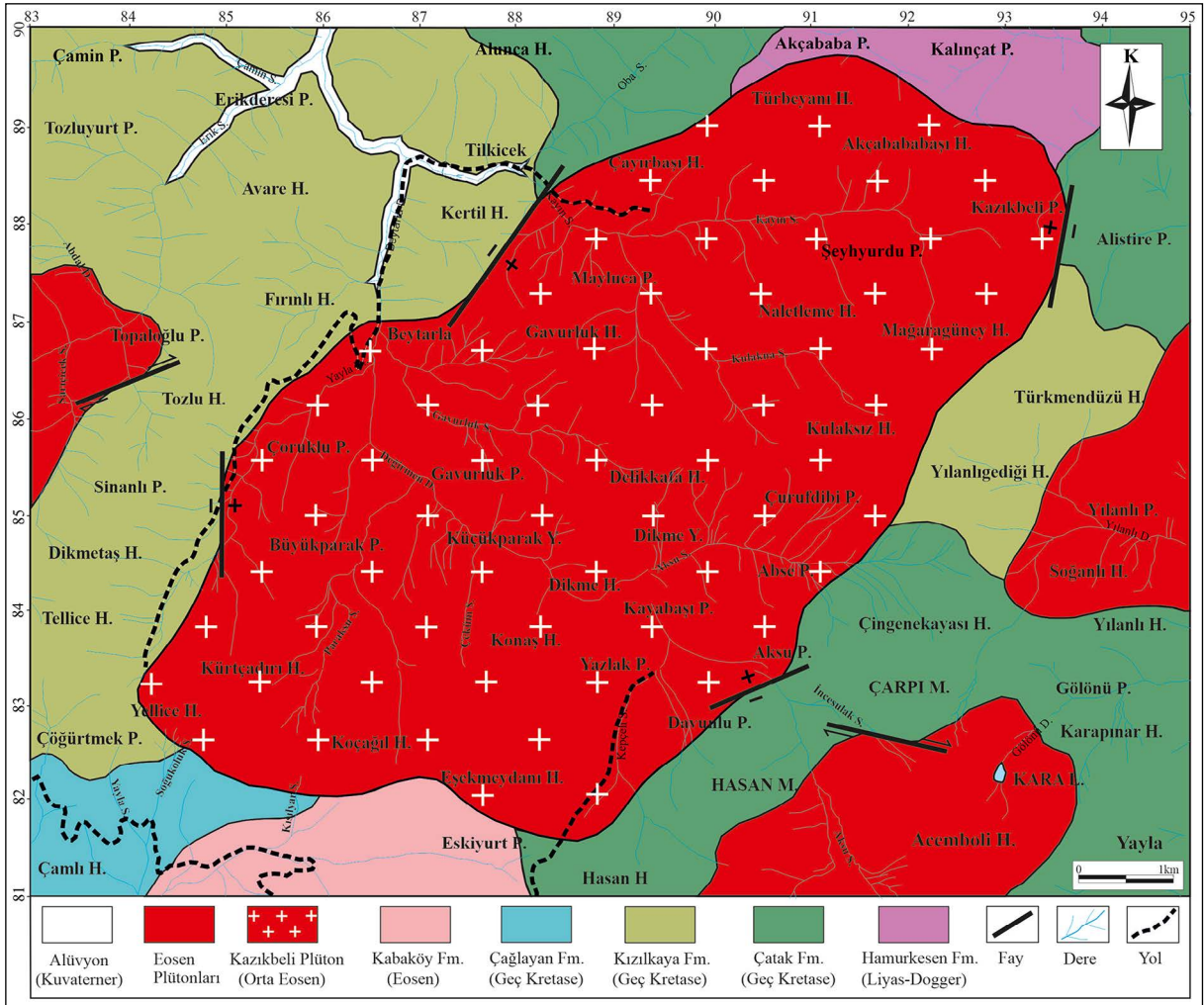
Kazıkbeli Plütönu'na ilişkin önceki incelemeler geniş jeolojik araştırmalarla tanımlanmıştır (Güven, 1993). Derinlemesine analizler yakın zamanda yalnızca bu makalenin başyazarı tarafından doktora tezi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, Güloğlu (2022)'nin kapsamlı doktora araştırmasının belirli bir yönünü ele almaktadır.

Bu araştırma, Gümüşhane'nin Kürtün bölgesinde açığa çıkan Orta Eosen Kazıkbeli Plütönu'nun petrografik ve mineral kimyasal özelliklerine odaklanmaktadır (Şekil 2). Çalışma, mineral kimyası

verilerini kullanarak plütönu kristalleşme sırasında etkili olan termobarometrik koşulları (basınç ve sıcaklık) ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır. Elde edilecek bulgular, plütönu oluşum koşullarına ilişkin mevcut bilgi birikimine katkıda bulunacaktır.

2. Kazıkbeli Plütönu'nun Jeolojik Konumu ve Arazi Yapısı

Çalışma alanındaki jeolojik kayıtlar, bir dizi sedimanter ve volkanik birimi ortaya çıkarmaktadır (Şekil 2). Açığa çıkan en eski birim Liyas-Doggeriyen Dönemi'ne ait esas olarak bazaltik ve andezitik lavlar ile küçük piroklastiklerden oluşan Hamurkesen Formasyonu'dur (Ağar, 1977). Bu formasyonun mostraları çalışma bölgesinin kuzeyinde küçük bir alanla sınırlıdır. Hamurkesen Formasyonu'nun üstünde uyumlu bir şekilde yer alan yaygın Geç Kretase Dönemi'ne ait Çatak Formasyonu bulunmaktadır (Güven, 1993). Bu formasyon, çalışma alanında baskın olup alt seviyelerde andezitlerle karakterize edilir ve yukarı doğru az miktarda andezit, kireçtaşı ve tüflerin ara katmanlarını içeren tuf ağırlıklı dizilimlere geçiş yapmaktadır. Geç Kretase stratigrafisi, Çatak Formasyonu'nun üzerine gelen yaygın dasit ve piroklastikler içeren Kızılkaya Formasyonu (Güven, 1993) boyunca devam eder. Başka bir Geç Kretase birimi olan Çağlayan Formasyonu (Güven, 1993), bahsedilen formasyonların üzerine uyumlu bir şekilde yer almakta ancak çalışma alanının güneybatı kısmında sınırlı bir yayılım sergilemektedir.



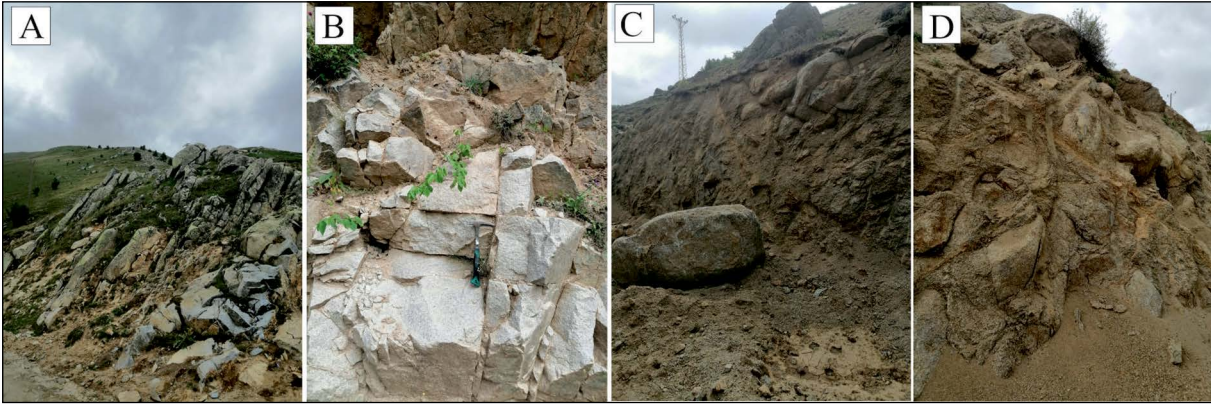
Şekil 2- Çalışma alanının jeolojik haritası (Güloğlu, 2022'den alınarak değiştirilmiştir).

Bu formasyon bazalt-andezit ve ilişkili piroklastiklerden oluşmaktadır. Geç Kretase formasyonlarının üzerinde uyumsuz olarak Eosen Dönemi'ne ait Kabaköy Formasyonu yer almaktadır (Güven, 1993). Bu formasyon, nummulitik kumlu kireçtaşı ve tüfitlerden aglomeralara ve üst seviyelerde hornblend andezit ve piroklastiklere geçiş gösteren belirgin bir sekansı sergilemektedir. Kazıkbeli Plütonu da dahil olmak üzere Eosen Dönemi'ne ait plütonlar, daha önce tanımlanan tüm oluşumları intrüze eder. Kuvaterner alüvyonları ise çalışma alanındaki en genç jeolojik birimleri temsil etmektedir (Şekil 2).

Kazıkbeli Plütonu, kuzeydoğu - güneybatı doğrultulu uzun eksenli ile uzun ve eliptik bir şekil sergilemektedir (Şekil 2). Boyutu 5-7 km genişlik ve 8-10 km uzunluk arasında değişmektedir ve yaklaşık 46 km²'lik bir alanı kaplamaktadır. Plüton, Alt Jura'dan

Eosen dönemine kadar uzanan çeşitli formasyonlarla intrüviz temaslar gösterir. Bu formasyonlar arasında Hamurkesen Formasyonu (Alt Jura), Çatak Formasyonu (Geç Kretase), Kızılkaya Formasyonu (Geç Kretase), Çağlayan Formasyonu (Geç Kretase) ve Kabaköy Formasyonu (Eosen) bulunmaktadır. Kontak zonları, lokalize epidotlaşma ve kloritleşme ile kanıtlanan önemli alterasyon ile karakterize edilir. Faylanmış kontak zonları, normal faylanmadan etkilenen alanlarda yaygın olan breşleşmiş yapılar ve ezilme zonları ile birlikte çarpma kayma ve normal fay hareketinin kanıtlarını göstermektedir.

Kazıkbeli Plütonu, özellikle Kazıkbeli Yaylası, Beytarla, Çurufdibi Yaylası, Davunlu Yaylası, Dikme Yaylası ve Gavurluk Yaylası çevresinde belirgin soğuma kırıkları ile karakterize edilmektedir (Şekil 3a ve b). Bu alanlar, iyi gelişmiş bir dağınık



Şekil 3- a-b) Kazıkbeli Plütönu kayaçlarındaki çatlama sistemleri, c-d) Kazıkbeli Plütönu kayaçlarında gözlenen arena oluşumu.

çatlak sistemini ve iyi bloklanmış kayaç yapısını sergilemektedir (Şekil 3a-b). Buna karşın, kenar bölgelerdeki plütönik kayaçlar daha yoğun kırılma ve çatlama sergilemektedir ve iyi bloklanmış bir yapıdan yoksundur. Genel olarak, Kazıkbeli Plütönu sağlam bir görünüm sunmakta ve minimal bir aşınma sergilemektedir. Ancak, aşınmış bölgelerde, kayaçlar gevşek hale gelmekte ve kumlu, toprak benzeri bir doku kazanmaktadır (Şekil 3c-d).

3. Malzeme ve Yöntem

Araştırma kapsamında arazi çalışmaları sırasında toplam 50 kayaç örneği toplanmış ve bu örneklerin ince kesitleri hazırlanarak polarize mikroskop altında detaylı petrografik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca bu örneklerin 39'u için modal analizler gerçekleştirilmiştir. Modal analizlerde, 1000 ila 1100 noktasında yaklaşık 0,5 ila 0,8 mm ve 1500 ila 1600 noktasında 1,0 ila 1,5 mm arasında tane boyutuna sahip kesitler için sayımlar yapılmıştır. Sayılan numuneler için hata formülleri kullanılarak sayım hataları hesaplanmış ve dört numune için sayımlar tekrarlanmıştır. Çalışılan plütönik kayaçtan alınan iki kayaç örneğinin (gabroyik diyorit ve granodiyorit) mineral kimyası (mikroprob) analizleri Amerika Birleşik Devletleri'ndeki New Mexico Teknoloji Üniversitesi Jeoloji ve Mineral Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Önceden hazırlanmış parlak kesit örneklerinin analizleri 15 kV voltaj ve 20 nA akımı değerleri altında CAMECA SX 100 Elektron mikroprobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan ışın çapı 10 µm ve Al, Si, Ti, Ca, Mn, Fe, Mg, K ve Na elementleri

için sayım süreleri 10 saniye olarak ayarlanmıştır. Elektron mikroprob analizlerinde piroksen, amfibol, epidot, zirkon ve Fe-Ti oksit için 1 µm odaklı ışın kullanılmıştır. Mika, feldispat ve klorit analizleri sırasında Na (sodyum) kaybını en aza indirmek için hafifçe odaklanmamış 10 µm'lik bir ışın kullanılmıştır. Ölçümler için kullanılan standartlar diyopsit, kaersutit, albit, ortoklaz, biyotit, manyetit ve anortittir (UCB) (Nielsen ve Sigurdsson, 1981).

4. Sonuç

4.1. Kazıkbeli Plütösu'nun Petrografisi

İncelenen plütönik kayaçlar için modal analiz sonuçları Çizelge 1'de sunulmuştur. Modal mineraloji ayrıca bir QAP diyagramında (Şekil 4) ve plütönun modal bileşimlere dayalı bir bölgeleme haritasında (Şekil 5) görselleştirilmiştir.

Kazıkbeli Plütönu kayaç örnekleri için QAP diyagramında (Streckeisen, 1976; Şekil 4) çizilen modal analizi verileri diyorit, kuvars diyorit, tonalit, granodiyorit ve monzograniti kapsayan bir bileşimsel spektrumu ortaya koymaktadır. Özellikle, en az bulunan kayaç türü olan monzogranitler, öncelikle plütönun orta bölgelerinde yoğunlaşmaktadır (Şekil 5).

Granodiyoritler, genellikle monzogranit zonunun çevresinde meydana gelen en yaygın dağılımı sergilemektedir (Şekil 5). Tonalitler, kuvars diyoritler ve diyoritler granodiyoritlere kıyasla daha az yaygındır ve tipik olarak plütönun kenarlarında yer alırlar (Şekil 5). Bu mekânsal dağılım, Kazıkbeli Plütönu içerisinde bileşimsel bir zonlanmaya işaret etmektedir.

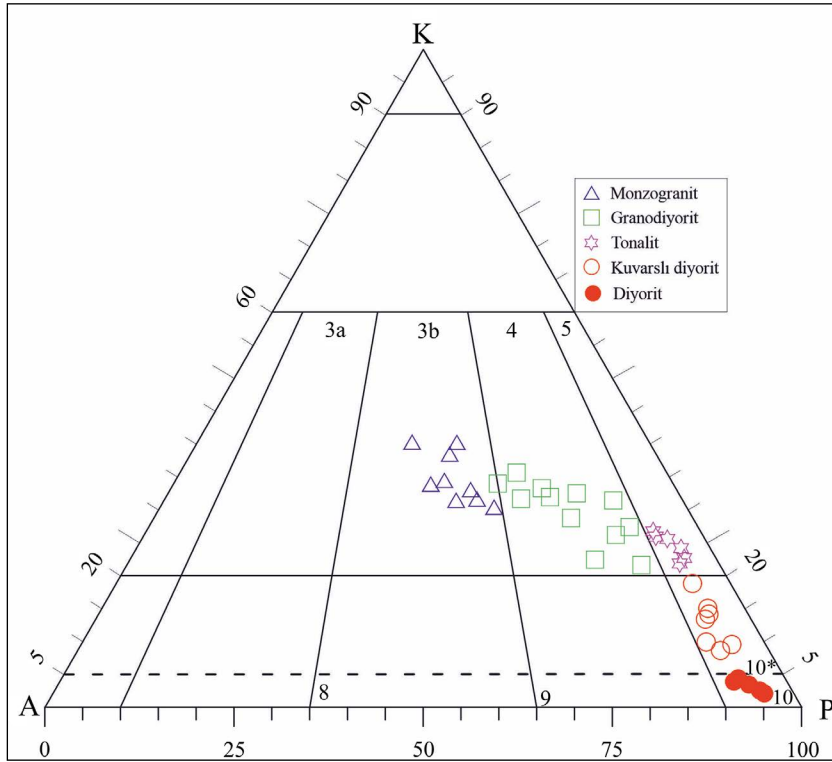
Çizelge 1- Kazıkbeli Plütönu'nun modal mineralojisi, kayaç örneklerinin modal analizlerinden elde edilen minimum, maksimum ve ortalama değerlerle özetlenmiştir.

Kayaç Türü	Plajiyoklaz	Kuvars	Ortoklaz	Amfibol	Biyotit	Opak Mineraller
Diyorit						
min	63,80	1,80	3,00	11,20	0,80	2,30
maks	80,40	3,70	5,20	21,40	2,20	6,10
ort	72,48	2,60	4,18	15,16	1,68	4,14
Kuvars Diyorit						
min	56,50	6,50	3,30	13,40	0,60	4,30
maks	64,00	13,95	5,82	20,50	5,70	4,80
ort	61,09	9,56	4,23	16,42	4,64	4,52
Tonalit						
min	37,10	19,72	7,40	1,90	0,90	1,35
maks	62,10	30,90	21,02	14,30	8,70	3,90
ort	48,14	26,11	13,51	6,04	4,22	2,25
Granodiyorit						
min	60,30	18,20	3,20	5,30	1,00	2,10
maks	61,90	24,10	5,60	12,40	2,20	2,90
ort	60,90	21,27	4,43	9,63	1,53	2,67
Monzogranit						
min	26,04	26,10	21,80	1,30	1,30	0,65
maks	39,10	37,00	30,00	7,70	7,39	3,00
ort	33,69	32,07	26,12	3,53	4,02	1,98
min: minimum değerler, maks: maksimum değerler, ort: ortalama değerler						

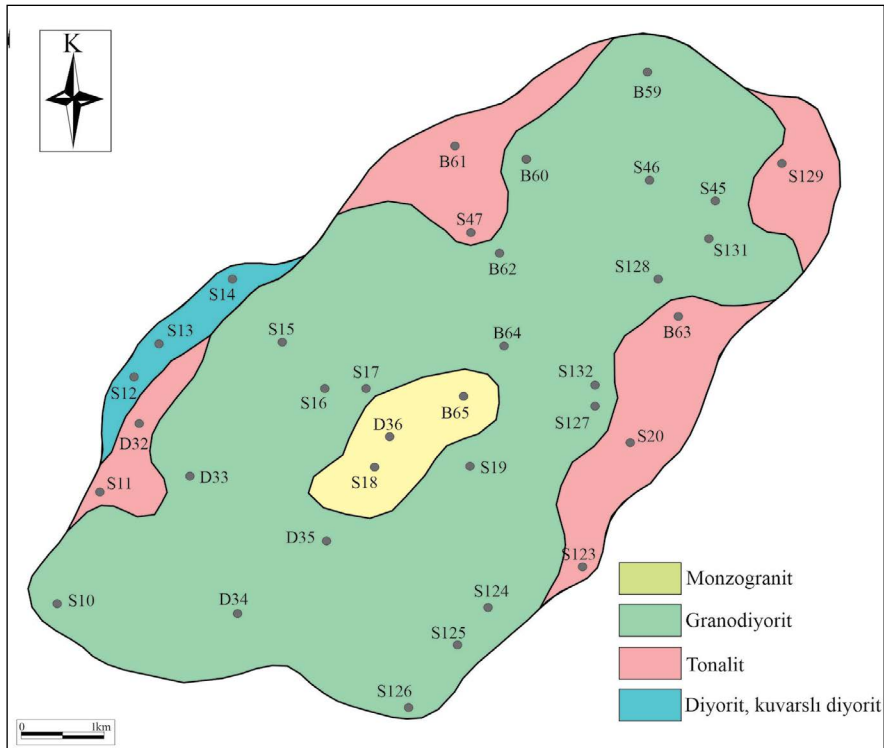
Mikroskobik incelemeler, Kazıkbeli Plütönu kayaçlarının ince ila orta taneli, porfirik, yer yer grafik, poikilitik ve perlitik olmak üzere çeşitli dokular sergilediğini ortaya koymaktadır (Şekil 6a-d). Plütönu'nun temel mineral bileşimi plajiyoklaz, kuvars, ortoklaz, amfibol, biyotit ve opak minerallerden oluşmaktadır. Aksesuar mineraller arasında apatit ve zirkon bulunmaktadır. Kayaçlarda tespit edilen ikincil mineraller kil mineralleri, serisit, klorit ve kalsittir.

Plajiyoklaz, idiomorfik ve yarı özşekilli tabular prizmatik kristaller şeklinde görülmektedir ve tüm örneklerde (26.04-80.40%; Çizelge 1) bulunan en bol mineraldir (Şekil 6a-d). Albit ikizleri yaygın olarak gözlenirken, ara sıra polisentetik (albit-periklin) ikizlere de rastlanmaktadır. Bazı büyük kristallerde salınlımlı zonlama mevcuttur (Şekil 6d). K-feldispat (ortoklaz) yarı özşekilli kristallere karşı özşekilsizdir ve kayaçlarda %3,0-30,0 oranında bulunur (Çizelge 1). Bazı minerallerde Karlsbad ikizlenmesi gözlenirken, diğerleri pertitik bir yapıyı sergilemektedir. Özellikle, bazı büyük ortoklaz kristalleri daha küçük plajiyoklaz

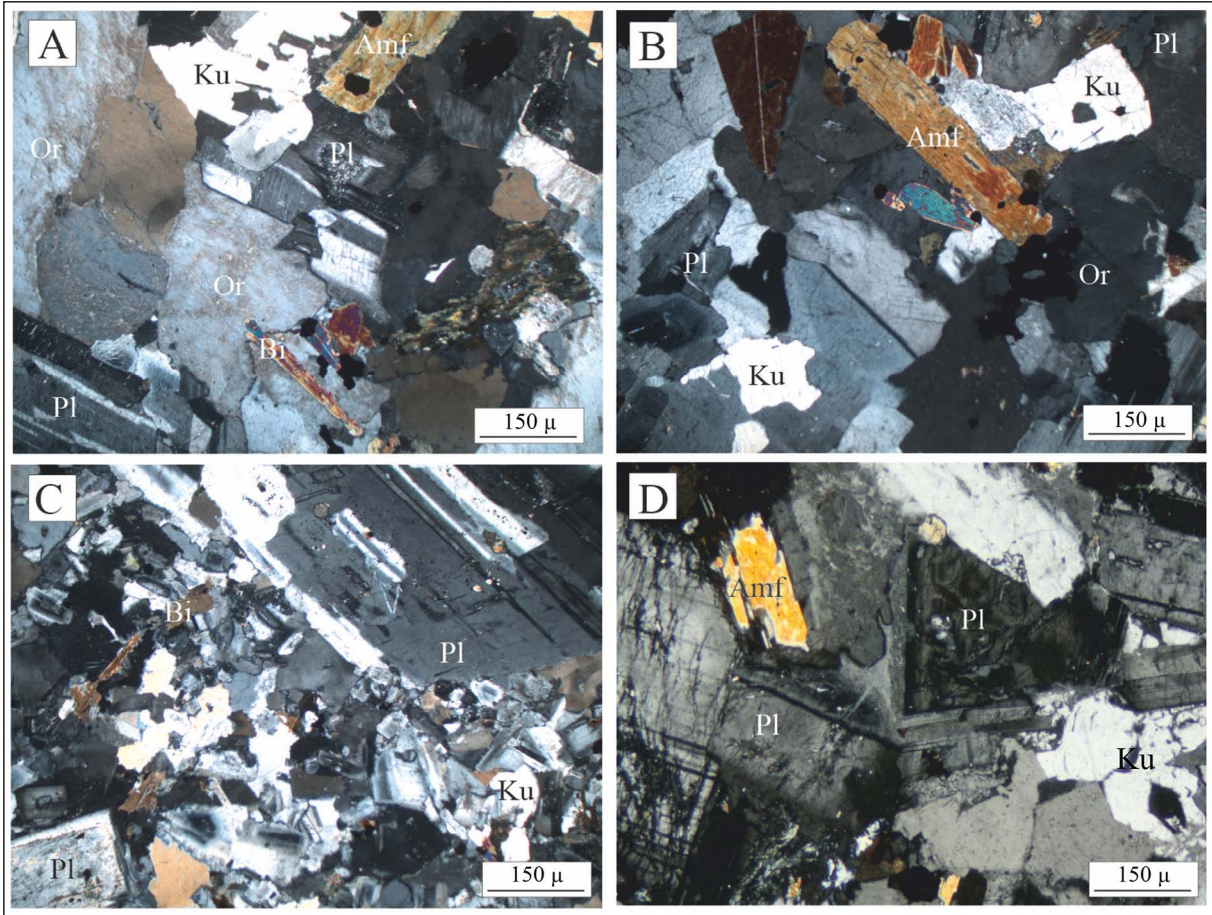
kristallerini çevreleyerek poikilitik bir doku oluşturur (Şekil 6c). Ayrıca, bazı durumlarda ortoklaz kuvars ve diğer mineraller arasındaki boşluğu doldurur (Şekil 6b). Kuvars, değişen boyutlarda özşekilsiz veya yarı özşekilli kristallerdir. Bazı kesitlerde kırıklı ve çatlaklı bir yapıya işaret eden dalgalı sönme gözlenmektedir (Şekil 6c). Kuvars bolluğu %1,8 ile %37 arasında değişmektedir (Çizelge 1). Amfibol idiomorfik ila yarı özşekilli tabaka şeklinde prizmatik kristallerdir. Daha büyük kristaller opak mineraller ve plajiyoklaz kapanımları içerebilir (Şekil 6a-b). Bazı kayaç örneklerindeki alterasyon klorit ve kalsit oluşumuyla sonuçlanmıştır. Bolluğu ise %1,3 ile %21,4 arasında değişmektedir (Çizelge 1). Biyotit, idiomorfik ila yarı özşekilli asiküler prizmatik kristallerdir ve %0,6-8,7 oranında bulunur (Çizelge 1). Pleokroizma bazı kesitlerde belirgindir ve feldispat ile birlikte biyotitin klorite kısmi alterasyonu gözlenmiştir (Şekil 6c). Apatit tipik olarak kuvars ve feldispat içinde iğne benzeri kapanımlar olarak ortaya çıkar. Zirkon hemen hemen tüm kayaçlarda küçük, özşekilli prizmatik kristaller



Şekil 4- QAP sınıflandırma diyagramı (Streckeisen, 1976) Kazıkbeli Plütonu'ndan kaya örneklerinin modal bileşimlerini göstermektedir (3a: siyenogranit, 3b: monzogranit, 4: granodiyorit, 5: tonalit, 8: monzonit, 9: monzodiyorit/gabro, 10: diyorit/gabro, 10*: kuvarlı diyorit/gabro).



Şekil 5- Kazıkbeli Plütonu'ndan alınan kaya örneklerinin modal bileşimlerine dayalı konumlar ve diferansiyasyon haritası (S, B, D: örnek konumları).



Şekil 6- Çalışılan plütunun kayaçlarında gözlenen mikroskobik özellikler, a) Büyük ortoklaz kristalleri içeren ince ila orta taneli doku, b) Taneli doku, c) Daha büyük plajiyoklaz fenokristalleri içinde yer alan küçük plajiyoklaz kristalleri ile karakterize edilen poikilitik doku, d) Zonlu plajiyoklaz kristali (Çapraz Nicol, Pl: plajiyoklaz, Or: ortoklaz, Qz: kuvars, Amp: amfibol Bt: biyotit).

olarak gözlenir. Opak mineraller özşekilli ve yarı özşekilli kristaller halinde incelenen kayaçların %0,7-6,1'inde bulunur (Çizelge 1).

4.2. Mineral Kimyası

4.2.1. Plajiyoklaz

İncelenen Kazıkbeli Plütunu'ndaki plajiyoklaz minerallerinin mikroprob analizi, An_{26} ve An_{66} arasındaki bileşimsel farklılıkları ortaya koymaktadır (Çizelge 2; Şekil 7). Hem mafik (gabroyik diyorit) hem de felsik (granodiyorit) litolojilerdeki plajiyoklazlar %51 ila 61 arasında değişen SiO_2 , ağırlıkça %24 ila 30 arasında değişen Al_2O_3 , ağırlıkça %0,2 ila 0,5 arasında değişen FeO^T ve %0,2 ila 0,5 arasında değişen K_2O içeriğini sergilemektedir (Çizelge 2).

Kazıkbeli Plütunu'nun gabroyik diyoritlerindeki plajiyoklazlar, An içeriğindeki An_{47} ve An_{64} arasındaki dalgalanmalarla karakterize edilen salınımlı zonlamayı gösterir (Çizelge 2).

4.2.2. K-Feldispatlar

Eosen Dönemi'ne ait kayaçların incelenmesi çoğu örnekte K-feldispat minerallerinin varlığını ortaya koymuştur. Bu K-feldispat minerallerinin kimyasal analizleri (Çizelge 3) SiO_2 (ağırlıkça %63-65), Al_2O_3 (ağırlıkça %19-20) ve BaO (ağırlıkça %0,03-0,72) değişimlerini belgelemiştir (Çizelge 3; Şekil 8). Özellikle, tüm K-feldispat mineralleri ortoklaz bileşimi sergilemiş (Şekil 9) ve kristaller içinde kimyasal zonlamaya dair bir kanıt bulunmamıştır. Genel kayaç bileşimleri Or_{80} ile Or_{97} arasında değişmektedir (Çizelge 3; Şekil 8).

Çizelge 2- Plajiyoklazın mikroprob analiz değerleri.

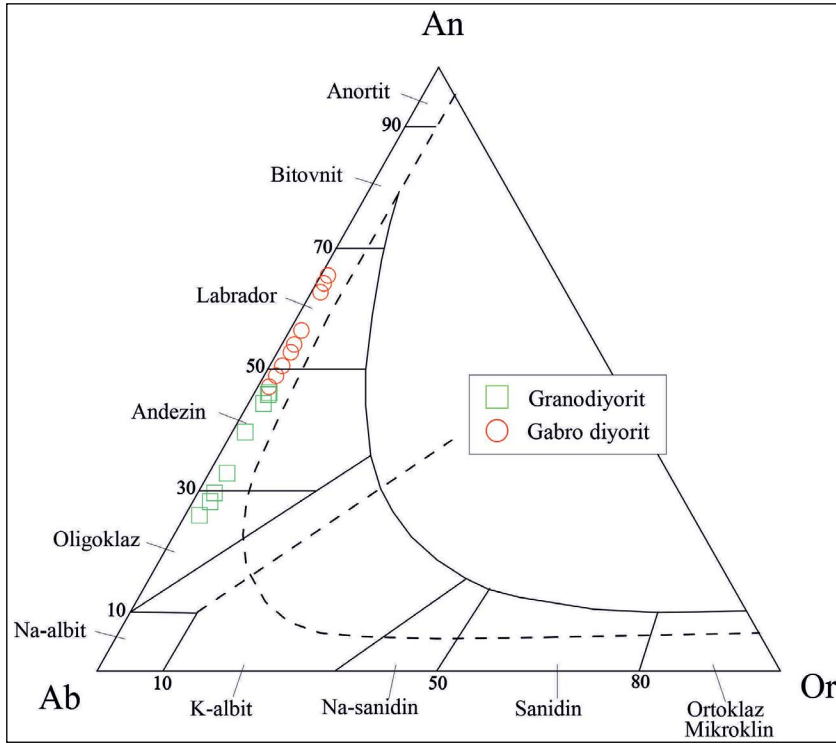
Kayaç Türü	Gabroyik diyorit								
	S 13-01	S 13-02	S 13-03	S 13-04	S 13-05	S 13-06	S 13-07	S 13-08	S 13-11
(r-c)	(r)	(r)	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)	(r)
SiO ₂	55,39	54,74	51,91	54,69	51,26	54,08	53,90	53,03	50,96
Al ₂ O ₃	27,84	27,68	30,02	27,87	30,05	28,02	28,5	28,59	30,34
FeO ^T	0,35	0,33	0,44	0,48	0,37	0,36	0,38	0,51	0,35
CaO	9,92	10,45	12,71	10,17	13,02	10,81	10,90	11,26	13,33
Na ₂ O	5,97	5,44	4,02	5,67	3,89	5,12	4,91	4,62	3,76
K ₂ O	0,29	0,32	0,23	0,31	0,19	0,34	0,31	0,29	0,18
BaO	0,06	0,06	0,06	0,07	0,04	0,05	0,05	0,06	0,03
SrO	0,10	0,17	0,09	0,14	0,12	0,09	0,15	0,10	0,17
Total	99,92	99,19	99,48	99,40	98,94	98,87	98,85	9,46	99,12
Si	2,50	2,50	2,37	2,49	2,36	2,47	2,47	2,44	2,34
Al	1,48	1,49	1,62	1,50	1,63	1,51	1,52	1,55	1,64
Fe ⁽ⁱⁱ⁾	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
Ca	0,48	0,51	0,62	0,50	0,64	0,53	0,53	0,56	0,66
Na	0,52	0,48	0,36	0,50	0,35	0,45	0,4	0,41	0,34
K	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
An	47,08	50,54	62,74	48,90	64,18	52,78	54,08	560	65,51
Ab	51,28	47,61	35,91	49,33	34,70	45,24	44,09	41,87	33,44
Or	1,64	1,84	1,35	1,77	1,12	1,98	1,83	1,73	1,05

FeO^T toplam demir içeriği olarak ölçülmüştür. Formül 8 oksijen baz alınarak hesaplanmıştır. r: kenar. c: merkez.

Çizelge 2- Devamı.

Kayaç Türü	Granodiyorit								
	S 19-01	S 19-02	S 19-03	S 19-07	S 19-08	S 19-11	S 19-12	S 19-15	
(r-c)	(r)	(c)	(c)	(c)	(r)	(c)	(r)	(r)	
SiO ₂	56,03	55,39	55,11	59,40	60,61	57,06	61,16	59,78	
Al ₂ O ₃	26,97	27,54	27,42	24,59	24,51	26,36	23,86	25,02	
FeO ^T	0,47	0,48	0,49	0,30	0,24	0,33	0,26	0,32	
CaO	9,28	9,63	9,52	6,29	6,04	8,39	5,40	6,83	
Na ₂ O	6,19	5,97	5,98	8,02	8,26	6,85	8,34	7,44	
K ₂ O	0,39	0,38	0,38	0,44	0,46	0,34	0,37	0,47	
BaO	0,06	0,05	0,08	0,03	0,00	0,06	0,00	0,01	
SrO	0,10	0,13	0,12	0,08	0,04	0,04	0,06	0,10	
Total	99,49	99,57	99,10	99,15	100,16	99,43	99,45	99,97	
Si	2,54	2,51	2,51	2,68	2,70	2,58	2,74	2,67	
Al	1,44	1,47	1,47	1,31	1,29	1,40	1,26	1,32	
Fe ⁽ⁱⁱ⁾	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
Ca	0,45	0,47	0,47	0,30	0,29	0,41	0,26	0,33	
Na	0,54	0,53	0,53	0,70	0,71	0,60	0,72	0,64	
K	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	
An	44,30	46,11	45,78	29,49	28,05	39,59	25,80	32,75	
Ab	53,48	51,73	52,04	68,05	69,41	58,50	72,10	64,56	
Or	2,22	2,17	2,18	2,46	2,54	1,91	2,10	2,68	

FeO^T toplam demir içeriği olarak ölçülmüştür. Formül 8 oksijen baz alınarak hesaplanmıştır. r: kenar. c: merkez.



Şekil 7- Çalışılan plütonda feldispat bileşimlerini gösteren An-Ab-Or üçlü diyagramı (Smith ve Brown, 1988).

Çizelge 3- K-feldispatların mikroprob analiz değerleri.

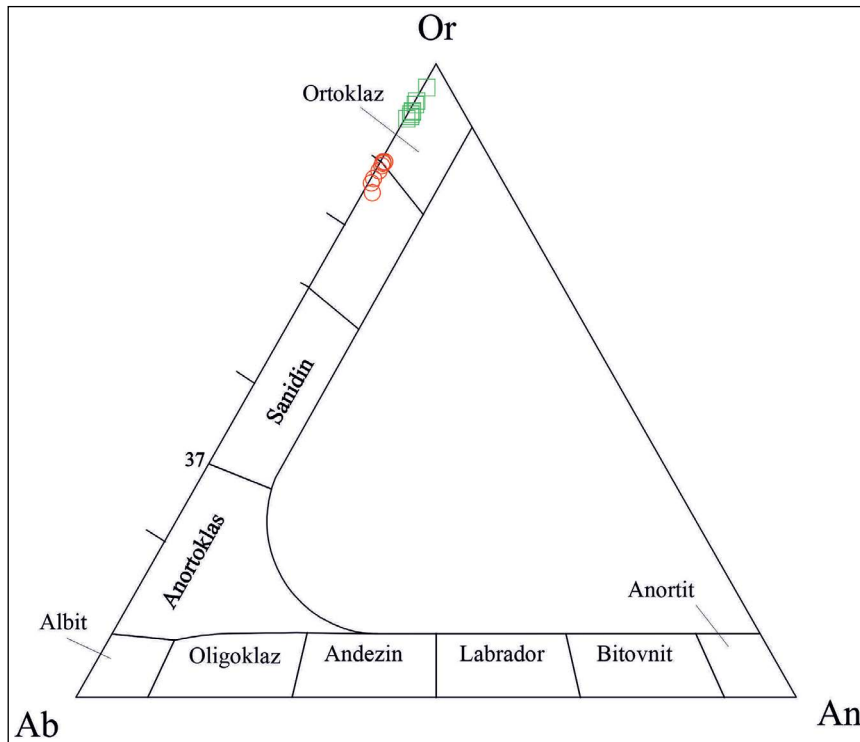
Kayaç Türü	Gabroyik diyorit							
	S 13-1	S 13-2	S 13-3	S 13-4	S 13-5	S 13-6	S 13-7	S 13-8
Numune	S 13-1	S 13-2	S 13-3	S 13-4	S 13-5	S 13-6	S 13-7	S 13-8
(r-c)	(r)	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)	(r)
SiO ₂	64,33	64,65	64,42	64,32	64,27	64,6	64,80	64,86
Al ₂ O ₃	18,91	19,12	19,04	19,15	19,14	19,52	19,02	19,08
FeO ^T	0,30	0,12	0,10	0,10	0,26	0,16	0,09	0,15
CaO	0,11	0,13	0,08	0,11	0,09	0,27	0,10	0,08
Na ₂ O	1,78	1,70	2,01	1,83	2,07	2,11	1,69	1,69
K ₂ O	14,58	14,70	14,09	14,13	13,89	13,43	14,24	14,37
BaO	0,03	0,07	0,21	0,28	0,26	0,72	0,12	0,09
SrO	0,03	0,03	0,05	0,09	0,03	0,08	0,07	0,07
Total	100,07	100,52	100,00	100,01	100,01	100,65	100,13	100,39
Si	2,97	2,97	2,97	2,96	2,96	2,95	2,98	2,97
Al	1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,05	1,03	1,03
Fe ⁽ⁱⁱ⁾	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
Ca	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
Na	0,16	0,15	0,18	0,16	0,18	0,19	0,15	0,15
K	0,86	0,86	0,83	0,83	0,82	0,78	0,83	0,84
Ba	0	0	0	0,01	0	0,01	0	0
An	0,53	0,63	0,39	0,54	0,44	1,34	0,50	0,40
Ab	15,57	14,86	17,75	16,36	18,39	19,02	15,21	15,10
Or	83,90	84,52	81,86	83,10	81,17	79,64	84,30	84,50

FeO^T toplam demir içeriği olarak ölçülmüştür. Formül 8 oksijen baz alınarak hesaplanmıştır. r: kenar. c: merkez.

Çizelge 3- Devamı.

Kayaç Türü	Granodiyorit							
	S 19-1	S 19-2	S 19-3	S 19-4	S 19-5	S 19-6	S 19-7	S 19-8
(r-c)	(r)	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)	(r)
SiO ₂	63,80	63,57	63,23	63,60	64,99	63,68	63,86	63,80
Al ₂ O ₃	18,97	18,96	18,73	18,70	19,14	18,88	18,92	18,93
FeO ^T	0,09	0,04	0,13	0,21	0,03	0,04	0,10	0,01
CaO	0,09	0,11	0,07	0,10	0,06	0,05	0,13	0,12
Na ₂ O	0,79	0,79	0,67	0,83	0,95	0,62	0,84	0,35
K ₂ O	15,86	15,69	15,62	15,57	15,70	15,74	15,21	16,28
BaO	0,18	0,51	0,45	0,24	0,21	0,40	0,54	0,29
SrO	0,05	0,07	0,03	0,05	0,08	0,06	0,10	0,03
Total	99,83	99,74	98,93	99,30	101,16	99,47	99,70	99,81
Si	2,96	2,96	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97
Al	1,04	1,04	1,04	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04
Fe ⁽ⁱⁱ⁾	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
Na	0,07	0,07	0,06	0,08	0,08	0,06	0,08	0,03
K	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,94	0,90	0,97
Ba	0	0,01	0,01	0	0	0,01	0,01	0,01
An	0,44	0,54	0,35	0,50	0,29	0,25	0,66	0,60
Ab	7,01	7,07	6,10	7,46	8,40	5,63	7,69	3,15
Or	92,55	92,39	93,55	92,05	91,31	94,11	91,65	96,26

FeO^T toplam demir içeriği olarak ölçülmüştür. Formül 8 oksijen baz alınarak hesaplanmıştır. r: kenar. c: merkez.



Şekil 8- K-feldispatlar için An-Ab-Or diyagramı kullanılarak hazırlanan sınıflandırma diyagramı (Deer vd., 1992'den).

4.2.3. Biotit

Biotitlerin mikroprob analizleri (Çizelge 4) %4,1 ila 4,7 arasında değişen TiO_2 , %12 ila 13 arasında değişen Al_2O_3 ve ağırlıkça %12 ila 14 arasında değişen MgO içeriklerini ortaya koymaktadır. Mg# [$Mg/(Mg + Fe^{+2})$] ve Fe# [$Fe^{+2}/(Fe^{+2} + Mg)$] oranları sırasıyla 0,52 ila 0,58 ve 0,42 ila 0,48 arasında değişmektedir (Çizelge 4). Bu değerler, biyotitlerin annit ve flogopit uç üyeleri arasında bileşimlere sahip katılaşmış eriyik ürünler/birimler olarak kristalleştığını ve flogopit katı çözültü serisinin magnezyum bakımından zengin ucuna yakın bir yerde bulunduğunu göstermektedir (Şekil 9a). Ayrıca, mikroprob analizleri biyotitleri $FeO^{(I)}-Al_2O_3$ diyagramının (Şekil 9b) C alanında sınıflandırmakta ve $FeO^{(I)}-Al_2O_3-MgO$ üçgen diyagramına (Şekil 9c)

göre piroksenler ve hornblendler ile bir arada bulunmaktadır. Son olarak, $MgO-FeO+MnO-TiO_2$ *10 üçgen diyagramı bu biyotitleri birincil kahverengi biyotitler (A alanı) olarak sınıflandırmaktadır (Şekil 9d).

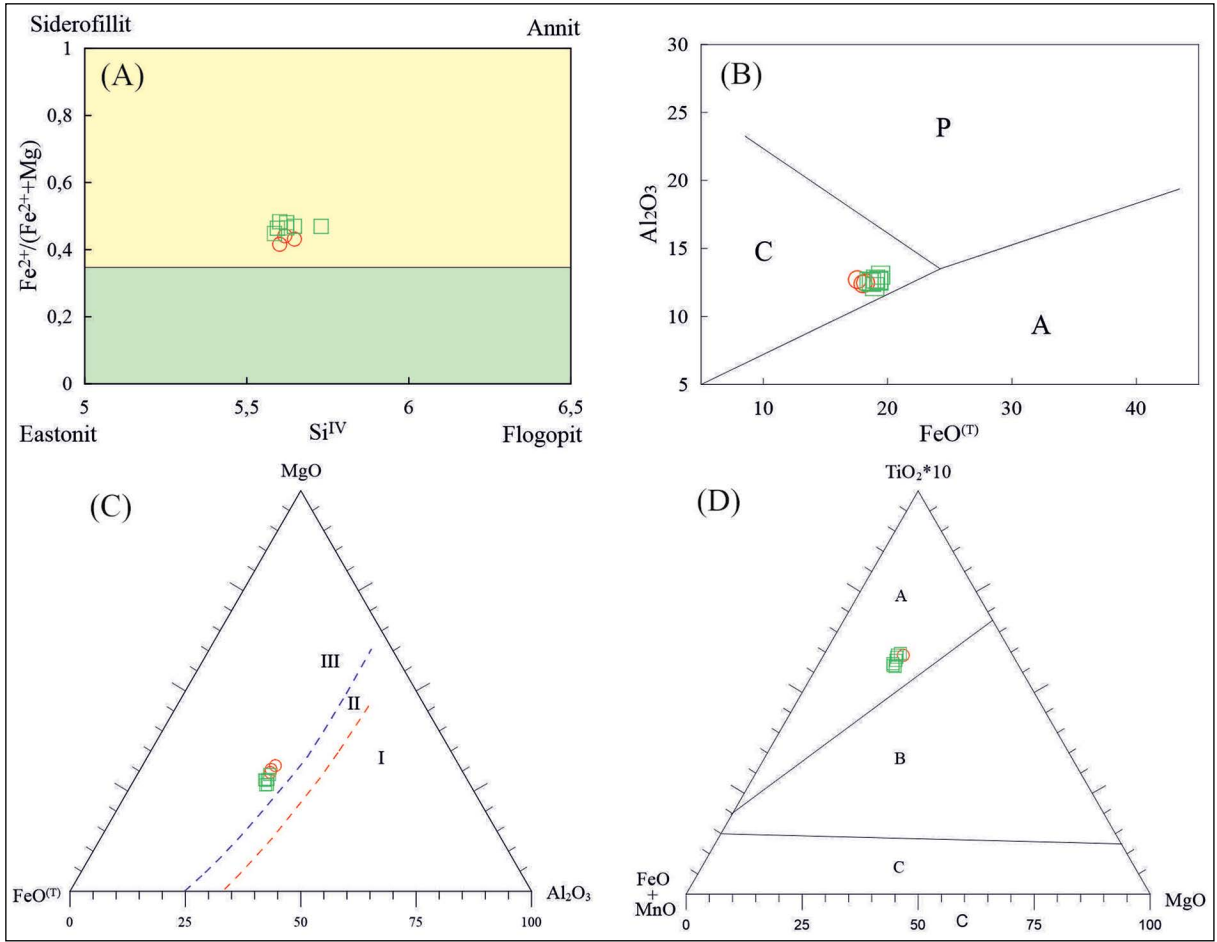
4.2.4. Amfibol

İncelenen plütonik kayalardan elde edilen amfibollerin mikroprob analizleri (Çizelge 5) %4,6 ila 6,2 arasında değişen Al_2O_3 içeriğini, %47,1 ila 50,2 arasında değişen SiO_2 içeriğini ve 0,63 ila 0,73 arasında değişen Mg# değerini ortaya koymaktadır. Sınıflandırma diyagramları, tüm amfibollerin Na'ya karşı (Ca+Na) oranına göre kalsik amfibol alanına ait olduğunu (Şekil 10a) ve Leake vd. (1997)'ne

Çizelge 4- Biotitlerin mikroprob analiz sonuçları.

Kayaç Türü	Gabroyik Diyorit			Granodiyorit						
	S 13-1	S 13-2	S 13-3	S 19-1	S 19-2	S 19-3	S 19-4	S 19-5	S 19-6	S 19-7
Numune	(r)	(c)	(c)	(r)	(c)	(r)	(c)	(c)	(c)	(c)
SiO_2	37,85	37,38	37,91	36,69	36,02	37,49	36,94	36,79	37,11	37,14
TiO_2	4,59	4,64	4,69	4,12	4,14	4,30	4,11	4,43	4,68	4,61
Al_2O_3	12,40	12,47	12,71	13,04	12,67	12,20	12,60	12,52	12,60	12,75
FeO^T	18,02	18,23	17,57	19,44	19,31	18,96	19,28	18,70	18,51	19,03
MnO	0,26	0,26	0,22	0,22	0,17	0,19	0,18	0,33	0,31	0,32
MgO	13,31	12,95	13,84	11,81	11,57	12,03	12,21	12,08	12,80	12,34
CaO	0,04	0,05	0,04	0,20	0,27	0,19	0,11	0,27	0,06	0,09
Na_2O	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,15	0,16	0,14	0,14	0,15
K_2O	9,50	9,44	9,50	8,67	9,11	8,73	9,10	9,02	9,32	9,28
Cl	0,19	0,26	0,24	0,32	0,33	0,30	0,25	0,27	0,41	0,27
F	0,40	0,38	0,44	0,14	0,14	0,18	0,19	0,32	0,31	0,35
Total	96,68	96,19	97,30	94,80	93,89	94,72	95,13	94,87	96,25	96,33
Si	5,65	5,62	5,60	5,62	5,60	5,73	5,65	5,62	5,59	5,59
Ti	0,52	0,52	0,52	0,47	0,48	0,49	0,47	0,51	0,53	0,52
Al	2,18	2,21	2,21	2,36	2,32	2,20	2,27	2,26	2,23	2,26
$Fe^{(ii)}$	2,25	2,29	2,17	2,49	2,51	2,42	2,46	2,39	2,33	2,40
Mn	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04
Mg	2,96	2,90	3,05	2,70	2,68	2,74	2,78	2,75	2,87	2,77
Ca	0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,03	0,02	0,04	0,01	0,01
Na	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04
K	1,81	1,81	1,79	1,69	1,81	1,70	1,77	1,76	1,79	1,78
Cl	0,05	0,07	0,06	0,08	0,09	0,08	0,06	0,07	0,10	0,07
F	0,19	0,18	0,21	0,07	0,07	0,09	0,09	0,15	0,15	0,17
Fe#	0,43	0,44	0,42	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,45	0,46
Mg#	0,57	0,56	0,58	0,52	0,52	0,53	0,53	0,54	0,55	0,54

FeO^T toplam demir içeriği olarak ölçülmüştür. Formül 22 oksijen baz alınarak hesaplanmıştır. r: kenar. c: merkez.



Şekil 9- İncelenen kayalardaki biyotitlerin bileşimi: a) Si^{IV} - $(Fe^{2+}/Fe^{2+} + Mg)$ diyagramı (Parsons vd., 1991), b) $FeO^{(T)}$ - Al_2O_3 diyagramı (Abdel-Rahman, 1994) (C: dalma-batma ile ilişkili biyotitler, P: kıtasal çarpışma sonrası biyotitler, A: anorojenik bölgelerde oluşan biyotitler), c) $FeO^{(T)}$ - Al_2O_3 - MgO üçgen diyagramı (I: muskovit ve topaz ile ilişkili biyotitler, II: diğer mafik minerallerle ilişkili biyotitler, III: hornblend, piroksen veya olivin ile ilişkili biyotitler), d) MgO - FeO + MnO - TiO_2*10 üçgen diyagramı (Speer, 1984) (A: birincil kahverengi biyotitler, B: birincil yeniden dengelenmiş yeşil ve yeşilimsi kahverengi biyotitler, C: ikincil yeşil biyotitler).

göre bir magnezyohornblend bileşimi sergilediğini göstermektedir (Şekil 10b).

4.3. Kazıkbeli Plütönu'nu Oluşturan Magmanın Kristalleşme Koşulları

Magma içindeki minerallerin oluşumu ve kararlılığı öncelikle sıcaklık (T), basınç (P) ve oksijen fugasitesindeki (fO_2) değişimler tarafından şekillendirilir. Bu yoğun değişkenlerin (T, P, fO_2) belirlenmesi, magmanın kristalleşme geçmişi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Termodinamik ilkeler, belirli koşullar altında kristalleşen mineral fazlarının tahmin edilmesini sağlar. Bir kayadaki mineral bileşimi ve kompozisyonu, onun oluşumu sırasında P-T koşullarını belirlemek için kullanılabilir (termobarometre). Termodinamik hesaplamaların doğruluğu, P-T tahmininin tüm aşamaları boyunca

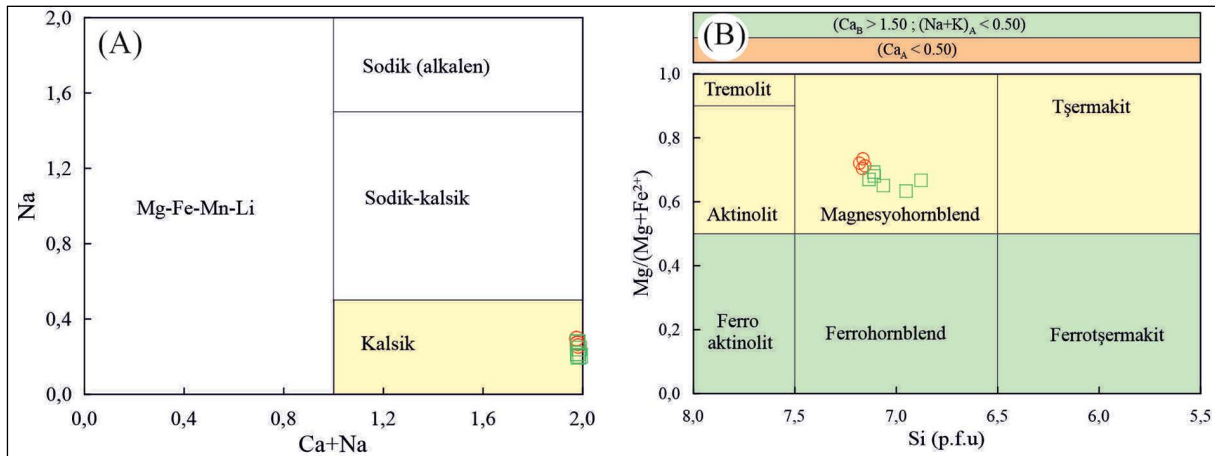
hataların tanımlanması ve yayılmasına bağlıdır. Genellikle, termobarometrik hesaplamalar sıcaklık için ± 30 - $50^\circ C$ ve basınç için ± 1 - $0,5$ kbar'lık belirsizlikler sergiler. Özellikle, plütönik kayalarda karşılaşılan mineral topluluklarının sınırlı çeşitliliği, hassas P-T tespiti için önemli bir zorluk teşkil etmektedir.

Kalkalkalin plütönik kayalarda amfibol-plajiyoklaz çiftinin her yerde bulunması, onları termobarometrik hesaplamalar için popüler bir seçim haline getirmektedir (Hammarstrom ve Zen, 1986; Hollister vd., 1987; Johnson ve Rutherford, 1989; Blundy ve Holland, 1990; Schmidt, 1992; Holland ve Blundy, 1994). Neyse ki, incelenen plütönlarin mineral bileşimi, hem amfibol hem de plajiyoklaz varlığı nedeniyle bu yaklaşıma uygundur. Bununla

Çizelge 5- Amfibollerin mikroprob analiz sonuçları.

Kayaç Türü	Gabroyik Diyorit				Granodiyorit					
	S 13-1	S 13-2	S 13-3	S 13-4	S 19-1	S 19-2	S 19-3	S 19-4	S 19-5	S 19-6
(r-c)	(r)	(c)	(c)	(c)	(r)	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)
SiO ₂	49,83	50,24	49,61	50,21	47,64	47,14	48,87	48,14	48,65	49,12
TiO ₂	0,77	0,89	1,07	0,83	1,30	1,15	0,80	0,88	1,13	0,83
Al ₂ O ₃	4,57	4,68	4,76	4,72	5,82	6,20	5,09	5,57	5,01	4,95
FeO ^T	15,39	14,80	14,48	14,93	16,43	16,35	16,02	16,14	14,24	15,63
MnO	0,53	0,54	0,47	0,51	0,54	0,55	0,49	0,47	0,43	0,57
MgO	14,27	14,55	14,50	14,62	13,02	13,18	13,26	12,97	14,29	13,86
CaO	11,09	11,15	11,17	10,99	11,15	10,90	11,27	11,34	11,40	10,97
Na ₂ O	1,22	1,12	1,13	1,14	1,50	1,50	0,97	1,05	1,30	1,27
K ₂ O	0,42	0,38	0,51	0,37	0,64	0,66	0,48	0,59	0,52	0,47
Total	98,09	98,35	97,70	98,32	98,04	97,63	97,25	97,15	96,97	97,67
Si	7,25	7,27	7,23	7,27	7,01	6,96	7,22	7,13	7,15	7,20
Ti	0,08	0,10	0,12	0,09	0,14	0,13	0,09	0,10	0,12	0,09
Al	0,78	0,80	0,82	0,80	1,01	1,08	0,89	0,97	0,87	0,85
Fe ⁽ⁱⁱ⁾	1,87	1,79	1,76	1,81	2,02	2,02	1,98	2,00	1,75	1,92
Mn	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,07
Mg	3,10	3,14	3,15	3,15	2,85	2,90	2,92	2,86	3,13	3,03
Ca	1,73	1,73	1,74	1,70	1,76	1,72	1,78	1,80	1,79	1,72
Na	0,69	0,63	0,64	0,64	0,86	0,86	0,56	0,60	0,74	0,72
K	0,08	0,07	0,09	0,07	0,12	0,12	0,09	0,11	0,10	0,09
Fe#	0,70	0,69	0,73	0,64	0,82	0,73	0,74	0,78	0,84	0,71
Mg#	0,70	0,72	0,71	0,73	0,63	0,67	0,67	0,65	0,68	0,69

FeO^T toplam demir içeriği olarak ölçülmüştür. Formül 23 oksijen baz alınarak hesaplanmıştır. r: kenar. c: merkez.



Şekil 10- a-b) İncelenen plütonik kayalardaki amfibollerin bileşimi (Leake vd., 1997).

birlikte, dikkatli olunması gerekmektedir. Aktinolit dönüşümü, kloritleşme ve opak minerallerin oluşumu gibi postmagmatik süreçler hornblend bileşimlerinin bütünlüğünü bozabilir (Hammarstrom ve Zen, 1986). Sonuç olarak, alterasyon gösteren

bileşenler termobarometrik hesaplamalardan titizlikle çıkarılmalıdır.

Bu araştırmada, incelenen plütonik kayaların kristalleşmesi sırasında hakim olan basınç (P), sıcaklık (T), oksidasyon durumu (fO_2) koşullarını ve

su içeriğini aydınlatmak için bir dizi termobarometrik hesaplama kullanılmıştır. Amfibol, plajiyoklaz, biyotit, K-feldispat, kuvars ve Fe-Ti oksitleri içeren mineral bileşenleri bu hesaplamalar için temel oluşturmuştur.

4.3.1. Jeobarometre

Kazıkbeli Plütönu'ndan alınan kayaçların kristalleşme basınçlarını belirlemek için çoklu denge yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım, amfibol-Al^(T) (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) jeobarometreleri gibi yerleşik barometreleri kullanarak kristalleşme basıncını kısıtlamaktadır. Bu barometrelerin sonuçları Çizelge 6'da sunulmuş ve aşağıda detaylandırılmıştır.

Plütönik kayaçlarda basınç tahmini genellikle amfibollerdeki Al^(T) analizi ile gerçekleştirilir. Bu yaklaşım, Hammarstrom ve Zen (1986), Hollister vd., (1987), Johnson ve Rutherford (1989) ve Schmidt (1992) tarafından belgelenmiş olan Al^(T) içeriği ile basınç arasındaki olumlu korelasyona dayanmaktadır. Al^(T) değerlerini basınç tahminlerine dönüştürmek için çeşitli kalibrasyonlar geliştirilmiştir ve her biri kristalleşme ortamına bağlı olarak belirli bir geçerliliğe sahiptir. Örneğin, Johnson ve Rutherford

(1989) kalibrasyonu ($P \text{ (kbar)} = 4.28 \text{ Al}^{(T)} - 3.54$), volkanik veya yüksek basınçlı plütönik ortam için en uygun olanıdır. Aksine, Hollister vd. (1987) kalibrasyonu ($P \text{ (kbar)} = 5.64 \text{ Al}^{(T)} - 4.76$) ve Hammarstrom ve Zen (1986) kalibrasyonu ($P \text{ (kbar)} = 5.03 \text{ Al}^{(T)} - 3.92$), yüksek basınçlı plütönik ortam için daha uygundur. Son olarak, Schmidt (1992) kalibrasyonu ($P \text{ (kbar)} = 4.76 \text{ Al}^{(T)} - 3.01$) düşük basınçlı ortam için tercih edilmektedir. Bu kalibrasyon etkinliğindeki farklılıklar, amfibollerde Al^(T) entegrasyonunu yöneten denge ilişkileri üzerinde çevresindeki mineral bileşiminin (plajiyoklaz, K-feldispat, biyotit, piroksen, manyetit, ilmenit ve potansiyel olarak sfen) etkisini vurgulamaktadır.

Kristalleşme basıncının hesaplanması, amfibollere uygulanan alüminyum-hornblend barometre tekniğini kullanarak gerçekleştirilmiştir; bu konu Çizelge 6'da detaylandırılmıştır. Bu yaklaşım, seçilen spesifik kalibrasyona bağlı olarak bir basınç aralığı vermiştir. Hammarstrom ve Zen (1986), 5,03 Al^(T) – 3,92 kbar olarak ifade edilen bir basınç aralığı önermiştir. Hammarstrom ve Zen'in hesaplamaları, gabroyik diyoritler için 0,07 ile 0,15 kbar ve granodiyoritler için 0,33 ile 1,44 kbar arasında değeri ortaya çıkarmıştır (Çizelge 6). Hollister vd. (1987), 5,64 Al^(T) – 4,76 kbar

Çizelge 6- Kazıkbeli Plütönu için amfibol-plajiyoklaz, amfibol ve biyotit kullanılarak hesaplanan basınç tahminleri.

	P (kbar) (Hammarstrom ve Zen, 1986)	P (kbar) (Hollister vd., 1987)	P (kbar) (Schmidt, 1992)	P (kbar) (Ridolfi vd., 2010)	P (kbar) (Ridolfi ve Renzulli, 2012)	P (kbar) (Uchida vd., 2007)
Mineraller	Amfibol-Plajiyoklaz			Amfibol		Biyotit
Gabroyik Diyorit						
Min	0,07	0,04	0,68	0,50	0,60	0,08
Maks	0,15	0,08	0,84	0,60	0,70	0,18
Ort	0,12	0,06	0,76	0,55	0,65	0,14
SD (±)	0,04	0,03	0,07	0,06	0,06	0,05
Min Derinlik (km)	0,3	0,1	2,5	1,9	2,2	0,3
Maks Derinlik (km)	0,6	0,3	3,1	2,2	2,6	0,7
Granodiyorit						
Min	0,33	0,11	1,01	0,60	0,70	0,13
Maks	1,44	1,25	2,06	0,90	1,00	0,61
Ort	0,78	0,62	1,44	0,75	0,82	0,36
SD (±)	0,44	0,48	0,42	0,10	0,12	0,18
Min Derinlik (km)	1,2	0,4	3,7	2,2	2,6	0,5
Maks Derinlik (km)	5,3	4,6	7,6	3,3	3,7	2,3
Min: Minimum, Maks: Maksimum, Ort: Ortalama, SP (±): Standart sapma. Kıtasa kabuk için derinlik 1kbar = 3,7 km olarak alınmıştır (Tulloch ve Challis, 2000).						

olarak belirli bir basınç aralığı oluşturmuş, gabroyik diyoritler için 0,04-0,08 kbar, granodioritler için ise 0,11-1,25 kbar aralıkları elde edilmiştir (Çizelge 6). Son olarak, Schmidt (1992) 4,76 Al^T – 3,01 kbar basınç tahminini üretmiş ve bu da gabroyik diyoritler için 0,68 ile 0,84 kbar ve granodioritler için 1,01 ile 2,06 kbar aralığına tekabül etmiştir (Çizelge 6).

Plütonik kayaların kristalleştiği basınç koşulları, amfibol mineral kimyası verileri kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu hesaplamalar için Ridolfi vd. (2010) ile Ridolfi ve Renzulli (2012) tarafından geliştirilen barometrik formüller (Çizelge 6) kullanılmıştır. Ridolfi vd. (2010) tarafından yapılan hesaplamalar, gabroyik diyoritler için 0,5-0,6 kbar ve granodioritler için 0,6–0,9 kbar olmak üzere 0,5–0,9 kbar arasında bir basınç aralığı sağlamıştır (Çizelge 6). Benzer şekilde, Ridolfi ve Renzulli (2012) yöntemi 0,6 ile 1,0 kbar arasında bir basınç aralığı vermiş, gabroyik diyoritler için 0,6 ile 0,7 kbar ve granodioritler için 0,7 ile 1,0 kbar arasında basınç değerleri elde edilmiştir (Çizelge 6).

Biyotit kristalleşme basınçları, Uchida vd. (2007) tarafından oluşturulan ampirik denklem kullanılarak belirlenmiştir. Mineral kimyası analizlerinden elde edilen Al^T içeriğine dayalı olarak kalibre edilen bu formül, çalışılan plütonik kayalar için 0,08-0,61 kbar arasında bir basınç aralığı sonucunu vermiştir (Çizelge 6). Dikkate değer bir şekilde, basınçlar gabroyik diyoritler için 0,08 ile 0,18 kbar ve granodioritler için 0,13 ile 0,61 kbar arasında değişmektedir (Çizelge 6).

4.3.2. Jeotermometre

Kristalleşme sıcaklıklarını tahmin etmek için amfibol-plajiyoklaz (Holland ve Blundy, 1994), amfibol (Ridolfi vd., 2010; Ridolfi ve Renzulli, 2012) ve biyotit (Luhr vd., 1984) jeotermometreleri kullanılmıştır. Bu jeotermometrelerden elde edilen sonuçlar Çizelge 7’de sunulmuş ve aşağıda detaylandırılmıştır.

Magma kristalleşme sıcaklıkları, Blundy ve Holland (1990) amfibol-plajiyoklaz jeotermometresi kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu yaklaşım, edenit, tremolit, pargasit, albit ve kuvarsi içeren iki denge tepkimesine dayanmaktadır. Hesaplama, amfibol ile plajiyoklaz arasındaki denge kristalleşmesi varsayımına dayanan basıncı (P) içeren bir formül [$T = 0.667P - 48.98 + Y / (-0.0429 - 0.008314 \ln K)$] kullanılmaktadır. Formülde, Y ve K değerleri amfibolün kompozisyonuna (X_{ab}, Si içeriği) dayanarak belirlenmektedir. Ancak, bu spesifik jeotermometre yalnızca belirli koşullar altında geçerlidir: (i) Amfibol-plajiyoklazın denge kristalleşmesi, kuvars, K-feldispat, biyotit, piroksen, Fe-Ti oksit ve sfen ile birlikte gerçekleşmelidir. (ii) Plajiyoklaz feldispat kompozisyonu, An₉₂’den daha az kalsik olmalıdır (albit molar fraksiyonu 0,08’i aşmalıdır). (iii) Eşzamanlı amfibol, formül birimi başına 7,8 atomun altında kationik Si içeriğine sahip olmalıdır. Bu tür amfibol-plajiyoklaz jeotermometresi, genellikle 500 ile 1100 °C arasındaki sıcaklıkları tahmin etmek için uygundur.

Çizelge 7- Kazıkbeli plütönu için amfibol-plajiyoklaz, amfibol ve biyotit kullanılarak hesaplanan basınç tahminleri.

	T (°C) (Blundy ve Holland, 1990)	T (°C) (Ridolfi vd., 2010)	T (°C) (Ridolfi ve Renzulli, 2012)	T (°C) (Luhr vd., 1984)
Mineraller	Amfibol-Plajiyoklaz	Amfibol	Amfibol	Biyotit
Gabroyik diyorit				
Min	742	740	744	768
Max	744	751	748	783
Ort.	743	746	746	773
SD (±)	1	5	2	9
Granodiyorit				
Min	757	738	712	721
Max	824	797	804	766
Ort.	784	766	756	736
SD (±)	29	22	35	18

Önerilen formüller kullanılarak yapılan hesaplamalarda, plüton içinde sıcaklıklar çalışılan kayalar için 742-824 °C arasında değişmektedir. Özellikle, gabroyik diyoritler için sıcaklıklar 742 ile 744 °C, granodiyoritler için ise 757 ile 824 °C arasında değişmektedir (Çizelge 7).

4.3.3. Oksijen Fugasitesi

Magma sistemlerindeki kristalleşme süreçleri, oksijen fugasitesini (fO_2) önemli ölçüde etkiler; bu, oksijenin kısmi basıncını temsil eder. Bu parametre, eritme davranışını yöneten basınç ve sıcaklık ilişkileri üzerinde kontrol sağlamak ve kayaçları oluşturan minerallerin stabilite alanlarını belirlemektedir (Wones, 1989; Ridolfi vd., 2010). fO_2 sıcaklık ile pozitif bir korelasyon gösterir ve genellikle sıcaklık arttıkça yükselir. Ayrıca, silikat eriyiklerin içindeki oksijen içeriği, süreci yönlendiren ısı kaynağına ve gaz karışım hızına bağlıdır (Wones, 1989). Ancak, granitik magmaların yaşadığı yavaş soğuma oranları nedeniyle, orijinal fO_2 değerinin doğrudan belirlenmesi zordur. Bu nedenle, araştırmacılar bu kritik parametreyi tahmin etmek için göreceli yaklaşımlar ve hesaplamalara başvurmuşlardır (Wones, 1989; Anderson ve Smith, 1995; Kemp, 2004).

Çalışılan plütonik kayalarda oksijen fugasitesi (fO_2), amfibol kompozisyonları ve Ridolfi vd., (2010) ile Ridolfi ve Renzulli (2012) tarafından geliştirilen oksiybarometri modelleri kullanılarak tahmin edilmiştir (Çizelge 8). Ridolfi vd., (2010)

formülasyonu, gabroyik diyoritler için 1,8-2,0 ve granodiyoritler için 1,3-1,7 değeri ile birlikte fO_2 değeri 1.3 ile 2.0 arasında sonuç vermiştir (Çizelge 8). Buna karşılık, Ridolfi ve Renzulli (2012) modeli fO_2 aralığını 0,2 ile 1,0 arasında vermiş, gabroyik diyoritler için 0,4-0,6 ve granodiyoritler için 0,2-1,0 değerinde sonuç elde edilmiştir (Çizelge 8).

Çalışılan kayaçlardaki oksijen fugasitesi (fO_2), Wones (1989) yöntemine dayanarak belirlenmiştir; bu yöntem basınç ve sıcaklık değerlerine dayanmaktadır. Bu basınç ve sıcaklık değeri, Ridolfi vd. (2010) ile özetlenen yaklaşımla hesaplanmıştır. Hesaplamalar, gabroyik diyoritler için -13,1 ile -13,4 ve granodiyoritler için -12,5 ile -13,8 arasında fO_2 değeri ile birlikte -13,8 ile -12,5 arasında bir aralık vermiştir (Çizelge 8).

4.3.4. Su İçeriği

Amfibol içeren magmaların su içeriği, %2-3'ten (Luhr vd., 1984) %5'e (Eggler, 1972; Helz, 1973; Naney, 1983) ve hatta %6'ya (Merzbacher ve Eggler, 1984) kadar değişen değeri ile bir tartışma konusu olmaya devam etmektedir. Bu çalışmada, incelenen örneklerdeki amfibollere dayanarak yapılan hesaplamalar, %4,4 ila %7,8 arasında su içeriği tahminini vermiştir. İncelenen plütonlarda bulunan su içeren mafik mineralleri, titanit ve apatitin varlığı (amfibol, biyotit), su ve diğer uçucu bileşenlerdeki zengin magma yapısını işaret edebilir. Özellikle, bu tür bileşimlere sahip yüksek sıcaklıkta magmalar,

Çizelge 8- Kazıkbeli plütonu için amfibol ve biyotit kullanılarak hesaplanan oksijen fugasitesi ve su içeriği tahminleri.

	DNNO (Ridolfi vd., 2010)	DNNO (Ridolfi ve Renzulli, 2012)	fO_2 (Ridolfi vd., 2010)	fO_2 (Wones, (1989)	H ₂ O (Ridolfi vd., 2010)	H ₂ O (Ridolfi ve Renzulli, 2012)
Mineraller	Amfibol			Biyotit	Amfibol	
Gabroyik Diyorit						
Min	1,80	0,40	-13,40	-14,72	3,90	4,50
Maks	2,00	0,60	-13,10	-14,31	4,30	4,60
Ort.	1,90	0,48	-13,20	-14,58	4,13	4,55
SD (±)	0,08	0,10	0,14	0,24	0,17	0,06
Granodiyorit						
Min	1,30	0,20	-13,80	-16,14	3,70	4,40
Maks	1,70	1,00	-12,50	-14,78	4,50	5,70
Ort.	1,52	0,52	-13,13	-15,67	4,17	4,83
SD (±)	0,16	0,46	0,47	0,54	0,31	0,51

tam kristalleşmeden önce kıtasal kabukta görece sığ derinliklere çıkabilir (Helmy vd., 2004).

İncelenen kayaçlardaki amfibollerin su içeriği, Ridolfi vd. (2010) ile Ridolfi ve Renzulli (2012) tarafından geliştirilen hidrometre formülleri kullanılarak belirlenmiştir (Çizelge 8). İncelenen kayaçlardaki amfibollerin hidrasyon durumları, Ridolfi vd. (2010) ile Ridolfi ve Renzulli (2012) tarafından önerilen hidrometre hesaplamalarıyla değerlendirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 8'de sunulmuştur.

İncelenen kayaçlardaki amfibollerin ortalama su içeriği, Ridolfi vd. (2010) yöntemini kullanarak %3,7 ila % 4,5 arasında belirlenmiştir (Çizelge 8). Özellikle, gabroyik diyoritler için %3,9 ila %4,3 ve granodioritler için %3,7 ila %4,5 arasında değişmektedir (Çizelge 8).

İncelenen kayaçlardaki amfibol su içerikleri, Ridolfi ve Renzulli (2012) tarafından geliştirilen yöntem kullanılarak belirlenmiştir (Çizelge 8). Bu hesaplamalar, gabroyik diyoritler için %4.4 ila %5.7 ve granodioritler için daha geniş bir aralık olan %4.4 ila %5.7 arasında ortalama su içeriği aralığı ortaya koymuştur (Çizelge 8).

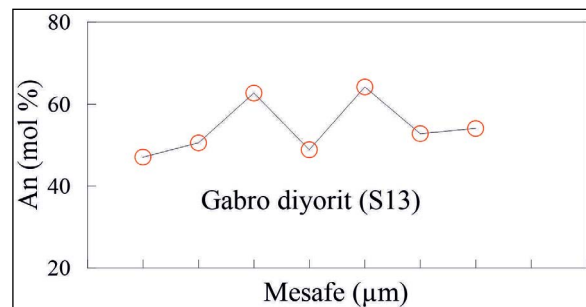
4.4. Denge Dışı Parametreler

Kayaçlardaki mineral bileşimleri ile dokusal özellikler arasındaki etkileşim, magma evrimi sırasında karşılaşılan çeşitli denge dışı türler hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Soğuma, dekompresyon ve magma karışımı gibi faktörler, sıcaklık, basınç ve bileşimde değişimlere neden olarak magmatik sistemi denge dışına yönlendirebilir (Nixon, 1988; Rutherford ve Hill, 1993; Simonetti vd., 1996; Perugini vd., 2003). Petrografik veya dokusal kriterler, dokusal dengesizliğin ana göstergeleri olarak hizmet ederler. Bunlar arasında, eleklenmiş plajiyoklaz kristalinin varlığı (Dungan ve Rhodes, 1978), tek bir örnek içinde normal ve eleklenmiş plajiyoklazın bir arada bulunması (Stimac ve Pearce, 1992; Venezky ve Rutherford, 1997) ve yuvarlak, kenarları yarık kristallerin varlığı (Stimac ve Pearce, 1992) yer alır. Bileşimsel kriterler, denge dışı süreçlere dair başka bir pencere sunar. Aynı örnek içinde hem normal hem de ters zonlu kristallerin varlığı, tanısal bir özellik olarak kabul edilir (Sakuyama, 1981). Bu zonlama

desenlerindeki değişiklikler, magmanın denge dışı süreçler geçirdiği sırada değişen kimyasal bileşimini yansıtır.

İncelenen kayaçlardaki dokusal, petrografik ve mineral bileşim özellikleri, özellikle plajiyoklazda dengesizlik süreçleri ve bileşimsel zonlama için güçlü kanıtlar sunmaktadır (Şekil 6). Plajiyoklaz kristallerinde gözlemlenen osilasyonlu zonlama, dengesizliğin iyi bilinen bir göstergesidir (Şekil 6d). Ayrıca, bu minerallerdeki zaman zaman görülen elek dokuları, bu yorumu daha da desteklemektedir. Bazı plajiyoklaz taneciklerinde ters zonlama varlığı, özellikle dikkate değerdir ve aynı örnek içinde hem normal hem de ters zonlu plajiyoklaz kristallerinin bir arada bulunması (Şekil 11) dengesiz kristalleşme için kesin bir kanıt teşkil etmektedir. Ayrıca, plajiyoklaz, amfibol ve opak mineralleri kapsayan K-feldispat poikiloblastlarının varlığı (Şekil 6), denge dışı kristalleşmeyi öne süren başka bir dokusal özelliktir

Plajiyoklaz kristallerindeki normal zonlama örüntüleri, fraksiyonel kristalleşme süreçlerine kolayca atfedilebilir. Bununla birlikte, ters zonlanmanın kökeni, çeşitli karşıt açıklamalarla birlikte bir tartışma konusu olmaya devam etmektedir: (i) Blundy ve Cashman (2001), suya doymuş/su ağırlıklı bir magma sistemi içinde hem sıcaklık hem de basınçtaki artış nedeniyle ters zonlanmanın ortaya çıkabileceğini öne sürmektedir. (ii) Alternatif olarak, Blundy vd. (2006), artan sıcaklıkların bir sonucu olarak suya doymuş/su ağırlıklı magmaların yükselmesi sırasında ters zonlanmanın gelişebileceğini öne sürmektedir. (iii) Couch vd. (2001) ve Streck (2008), daha soğuk magmaların daha sıcak, içeri akan magmalarla



Şekil 11- İncelenen plütonda zonlu plajiyoklaz minerallerinin An (%) değerlerinde gözlenen değişimler (Semboller Şekil 4'teki gibidir).

karişmasının sıcaklık artışına neden olarak plajiyoklazda ters zonlanmaya yol açabileceğini öne sürmektedir. İncelenen örnekler, tek tek plajiyoklaz kristallerinin kenarlarında geniş bir bileşim aralığı (An_{26-66}) sergilemektedir (Çizelge 2). Tek bir numune içindeki bu önemli bileşimsel değişkenlik, muhtemelen magmanın karişım süreçlerinden etkilenen plajiyoklaz için karmaşık bir kökenle tutarlıdır (Wallace ve Carmicheal, 1994).

4.5. Kabuğun İçindeki Magmanın Evrimi

Doğu Pontid (EP), jeolojik tarihi boyunca, özellikle Paleozoik-Mesozoik geçişinden bu yana baskın bir sıkıştırma tektonik rejimi yaşamıştır. Bu sıkıştırma, KD-GB ve KB-GD yönlerinde yönelmiş çatlak sistemlerinin gelişimine neden olmuştur. EP içindeki plütonların uzunlamasına eksenleri, bu temel çatlak eğilimleriyle güçlü bir ilişki sergilemektedir. Gedikoğlu (1979) bu gözlemi ilk kez belgeleyerek, bölgedeki sonraki çalışmalar da bu ilişkiyi daha fazla desteklemiştir (Kaygusuz vd., 2008, 2012, 2016, 2020, 2021).

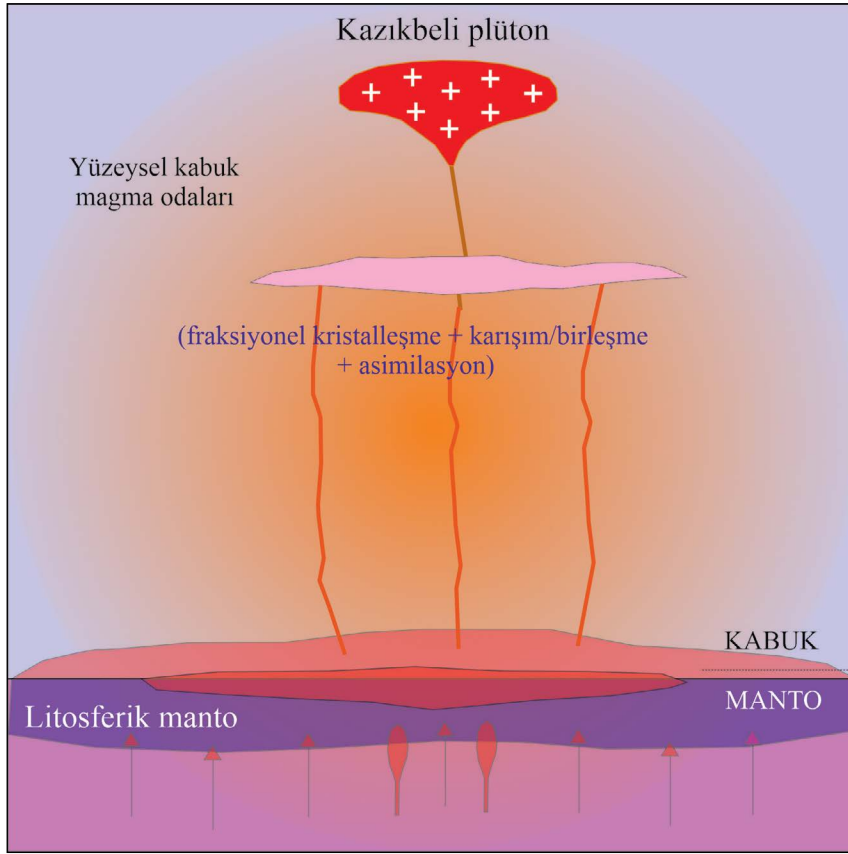
Saha gözlemleri, Kazıkbeli Plütonu'nun uzunlamasına, eliptik bir şekle sahip olduğunu ve bölgesel KD-GB yönlü faylara alt-paralel bir konumda bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu geometri, bir bölgesel tektonik zayıflık bölgesinde yerleşim önerisi sunmaktadır. Plüton, çevresindeki ince taneli ana kayaçlarla keskin ve uyumsuz kantağa sahiptir. Dikkate değer olarak, bu ana kayaçlar bazen porfirik ve granofirik dokular sergilemekte ve bazı yerlerde ana kayaçlardan türetilen ksenolitler plütone dahil edilmiştir. Şekil, kontak ilişkileri ve ksenolit varlığı gibi bu birleşik gözlemler, plütunun görece sığ kabuk derinliklerinde yerleştiğine işaret etmektedir.

Doğu Pontid'deki Erken Eosen Dönemi'ne ait (55 milyon yıl önce) adakitik kayaçların varlığı, yay kıtası çarpışmasının son aşamasına karşılık gelmekte olup, çarpışma sırası veya çarpışma sonrası bir geçmiş ile ilişkilendirilmektedir (Topuz vd., 2005, 2011; Karlı vd., 2010, 2011). Orta Eosen döneminde (46-40 milyon yıl önce), I-tipi, metalüminli, orta ila yüksek potasyum içeren ve zaman zaman şoşonitik plütonik kayaçların varlığı, çarpışma süreçleri ve sonraki jeodinamik süreçlerle bağlantılıdır. Önceden yapılmış çalışmalar

(Boztuğ vd., 2004; Topuz vd., 2005; Arslan ve Aslan, 2006; Karlı vd., 2007; Kaygusuz vd., 2011; Arslan vd., 2013; Aydınçakır, 2014; Kaygusuz ve Öztürk, 2015; Yücel vd., 2017; Temizel vd., 2018) jeokimyasal izlerin zenginleştirilmiş litosfer mantosundan veya alt kıtasal kabuktan ya da ikisinin karişımından kaynaklandığını göstermektedir. Eosen magmatizması, çarpışma ile ilişkili gerilme rejimi, çarpışma sonrası kabuk kalınlaşması ve litosferin delaminasyon ile ilişkilendirilmiştir (Kaygusuz vd., 2011; Karlı vd., 2012; Temizel vd., 2012; Arslan vd., 2013; Aslan vd., 2014; Yücel vd., 2017). Slab kırılmasından sonra meydana gelen litosfer delaminasyon, Kazıkbeli plütonik kayaçlarının oluşumuna yönelik bir mekanizma olarak önerilmektedir. Gelişen delaminasyon, astenosferin yukarı hareketini (yerel veya bölgesel) sağlamıştır; sıcak bir astenosfer termal anomalisine yol açarak kimyasal olarak zenginleşmiş litosfer mantosunun kısmen erimesine neden olmuştur ve Orta Eosen kayaçlarının oluşumunu sağlayan magmaları oluşturmuştur. Sonrasında, tektonik uzama nedeniyle kabukta incelleme ve çatlak sistemleri oluşmuş, bu erimelerin kabuk içinde yukarı doğru hareket etmesine olanak tanımıştır. Magmanın yukarı çıkışı sırasında, yaklaşık 3-5 km derinlikte bir kamara oluşmuş ve burada fraksiyonel kristalleşme ve magma karişımı olayları gerçekleşmiştir. Mineral bileşimleri ve petrografik özellikler (Çizelge 6) temelinde yapılan barometre tahminleri, bu magma odalarının 1 ile 8 km arasında derinliklerde mevcut olduğunu önermektedir (Şekil 12). Magma karişımı, elek dokusu ve zonlama gibi dokusal özelliklerle de desteklenmektedir. Son olarak, oksijen fugasitesi tahminleri, bu derinlikte kristalleşme sırasında oksidasyon koşullarının hâkim olduğunu göstermektedir.

5. Tartışma

Bu çalışmada kullanılan amfibol-plajiyoklaz ve amfibol barometreleri, 0,04 ila 2,06 kbar arasında karşılaştırılabilir basınç değerleri sağlamıştır (Çizelge 3). Biotit barometresi ile tahmin edilen basınçlar ise biraz daha düşük (0,08-0,61 kbar) olmakla birlikte, aynı genel aralıkta kalmaktadır. Bu bulgular, hornblend-Al barometresi kullanılarak elde edilen basınç değerlerinin jeolojik özelliklerle ve yerleşim derinlikleriyle iyi bir uyum gösterdiği literatürdeki



Şekil 12- Kazıkbeli Plütönu'nun kabuk içindeki yerleşimini ve gelişimini gösteren şematik kesit.

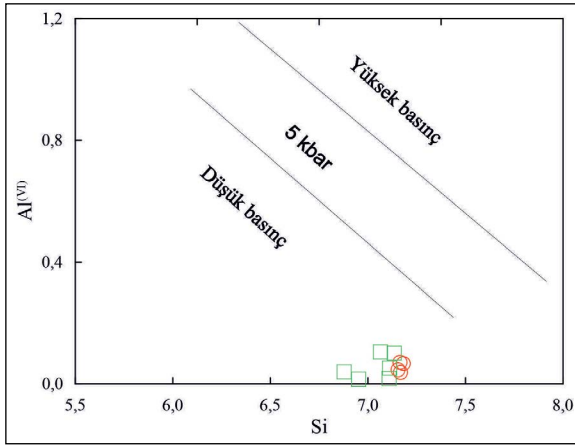
gözlemlerle tutarlıdır (Tulloch ve Challis, 2000). Farklı yöntemlerden elde edilen bu birleşik basınç tahminleri ve incelenen plütönlardan elde edilen nitel gözlemler ışığında, yerleşim basıncının yaklaşık 1-2 kbar arasında güvenle kısıtlanabileceği sonucuna varılmıştır. Plütön içindeki amfibollerin kalsik doğası, Al^{IV} değerlerinin 2,0'ın altında olmasıyla karakterize edilmesi, sıg bir intrüzyon ortamını desteklemektedir (Hammarstrom ve Zen, 1986). Plütönlarda gözlemlenen dokusal özellikler, porfirik dokuların ve mineral yeniden büyümesinin varlığı (Şekil 6) da sıg bir yerleşim derinliğini desteklemektedir.

Genellikle 700°C'nin üzerinde olan katı sıcaklıklar, amfibol-plajjiyoklaz yöntemi gibi termometrelerle tahmin edilmektedir (Anderson, 1996). Bu çalışmada kullanılan amfibol-plajjiyoklaz termometresi (Holland ve Blundy, 1994), 742-824 °C arasında dar bir sıcaklık aralığı verirken, amfibol termometresi de benzer şekilde 738-804 °C aralığında sıcaklık tahminini sağlamıştır (Çizelge 7). Ayrıca, biyotit termometresi (Luhr vd., 1984) daha düşük sıcaklık tahminini

(721-783 °C) göstermiştir (Çizelge 7). Ancak, bu düşük biyotit kaynaklı sıcaklıkların, feldispatın soğuması sırasında katılaşmadan önceki iç kristalin varyasyonlarla yeniden dengeleme ile ilgili olması muhtemeldir (Toksoy-Köksal, 2016). Hornblend-plajjiyoklaz termometresinden elde edilen geniş sıcaklık aralığı da yavaş soğuyan plütönik kayalarda yeniden dengeleme süreçlerini öne sürebilir.

Mineral kimyası, plütönik kayaların yerleşim derinliğini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Kazıkbeli Plütönu'ndaki amfibollerin mikroprob analizleri (Çizelge 5), bileşimlerinin Şekil 13'teki düşük basınç alanında yer aldığını göstermektedir. Bu jeokimyasal imza, yer kabuğunun görece sıg derinliklerinde kristalleşmenin gerçekleştiğini göstermektedir.

İncelenen plütönik kayalarda elde edilen basınç tahminleri, amfibol-plajjiyoklaz, amfibol ve biyotit barometrelerine dayanarak 0,04 ile 2,06 kbar arasında değişmektedir (Çizelge 6). Bu



Şekil 13- Kazıkbeli Plütonu'ndaki amfibollerin bileşimi ve basınç aralığı.

değer, Doğu Pontid'i'deki diğer Eosen plütonları için bildirilen basınç değerleri ile karşılaştırılabilir bir sonuçtur: Sarıçiçek ve Dölek plütonları için 1-3,8 kbar, Kemerlikdağı, Aydıntepe ve Pelitli plütonları için ise 0,1-2,8 kbar (Karlı vd., 2007; Kaygusuz vd., 2020). Ancak, incelenen plütonlardaki basınç değerleri, Sarıçiçek, Dölek, Üzengili, Arslandede ve Sorkunlu plütonları için raporlanan daha geniş aralıktaki bir değer ile karşılaştırıldığında sonuç (0,3-8,2 kbar; Eyüboğlu vd., 2017) genellikle daha düşüktür. Yüzeysel yerleşim derinliklerinin yorumunu destekleyen, amfibollerin bileşimsel özellikleridir. Bu amfiboller, $Al^{(I)}$ değeri genellikle 2,0'ın altında olan kalkık sınıfa girmektedir. Hammarstrom ve Zen (1986) tarafından yapılan çalışmalara göre, bu tarz düşük $Al^{(I)}$ içeriği, sıg kabuk seviyelerinde kristalleşmenin göstergesidir. Ayrıca, incelenen kayaçlardaki grafik birleşimler gibi dokusal özellikler, sıg yerleşim derinliklerini daha da doğrulamaktadır.

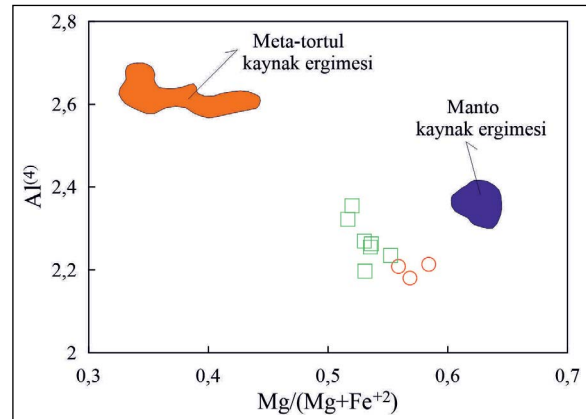
Amfibol, amfibol-plajiyoklaz ve biyotit bileşimlerini kullanarak yapılan termometre hesaplamaları, incelenen plütonik kayaçlarda 712 ile 824 °C arasında bir sıcaklık değeri elde etmiştir (Çizelge 7). Bu sıcaklık aralığı, Doğu Pontid'deki benzer yaşlardaki diğer plütonlar için bildirilen değerlerle uyumludur: Sarıçiçek ve Dölek plütonları için 617-768 °C (Karlı vd., 2007) ve Kemerlikdağı, Aydıntepe, Pelitli plütonları için 616-1172 °C (Kaygusuz vd., 2020). Ancak, incelenen plütonlar için sıcaklık aralığı, Sarıçiçek, Dölek,

Üzengili, Arslandede ve Sorkunlu plütonları için belgelenen daha geniş aralıkla karşılaştırıldığında (388-1196 °C; Eyüboğlu vd., 2017) daha dar bir pencere içinde kalmaktadır.

Amfibol-plajiyoklaz yöntemi gibi termometrelerin genellikle katı faz sıcaklığını (genellikle >700 °C) aşığı iyi bilinmektedir (Anderson ve Smith, 1995). İncelenen plütonik kayaçlar için, amfibol-plajiyoklaz termometresinden elde edilen sıcaklıklar beklenen katı faz değerinin altında kalmaktadır. Bu gözlem, amfibollerin, Moazzen ve Droop (2004) çalışmasıyla tanımlandığı gibi, alt-katı yeniden dengeleme süreçlerinden geçmiş olabileceğini düşündürmektedir.

İncelenen plütonik kayaçlardaki biyotit bileşimleri, potansiyel bir manto kökenine işaret eden özellikleri sergilemektedir. Bu biyotitler, orta düzeyde Al^4 içeriği (2.18-2.36 formül birimi biyotit başına; f.u.b.) ve kısmen yüksek Mg# değerini (0,52-0,58) göstermektedir (Şekil 14). Bu bileşimsel özellikler, genellikle 2,3-2,4 f.u.b. Al^{IV} içeriğine ve 0,60'ın üzerinde Mg# değerine sahip manto kaynaklı plütonlarda incelenen biyotitlerle kısmen benzerlik göstermektedir.

Granitik magmalardaki orijinal oksijen fugasitesini (fO_2) doğrudan belirlemek, yavaş soğuma sırasında meydana gelen kristalleşme sonrası süreçlerin etkisi nedeniyle zordur (Wones, 1989; Anderson ve Smith, 1995; Kemp, 2004). Bu nedenle, araştırmacılar fO_2 değerlerini tahmin etmek için göreceli yaklaşımlar



Şekil 14- İncelenen kayaçlardaki biyotitler için Al^{IV} 'e karşı $Mg/(Mg+Fe^{+2})$ diyagramı iki son üye eriyik alanını ayırt etmek için kullanılır: meta-sedimanter (Kemp, 2001) ve manto kaynaklı (Kemp, 2004).

ve hesaplamalara başvurmuştur. Çalışılan plütonik kayalarda hesaplanan $\log_{10} fO_2$ değerleri -12,5 ile -16,14 arasında değişmektedir. Dikkate değer bir şekilde, bu değerler, Eosen Sarıçiçek ve Dölek plütonları için rapor edilenlerle (-15 ila -21; Karlı vd., 2007) iyi bir uyum göstermektedir.

Çalışılan kayalarda amfibol, apatit ve titanit gibi suca zengin mafik minerallerin varlığı, su ve diğer uçucu bileşenler açısından zengin bir magma olduğunu önermektedir. Böyle yüksek sıcaklıklı, su açısından zengin magmalar, kısmen sıvı kalırken sıg kabuk derinliklerine yükselme yeteneğine sahiptir (Helmy vd., 2004). Amfibol içeren magmaların su içeriği hâlâ tartışma konusudur. Bununla ilgili Luhr vd. (1984), yaklaşık %2-3 civarında bir değer tahmini bildirirken, diğer çalışmalar ise ortalamanın %5 civarında olduğunu, Merzbacher ve Egger (1984) ise bu ortalamanın %6 olarak önermektedir (Egger, 1972; Helz, 1973; Naney, 1983). Önemli bir şekilde, incelenen plütonlarda analiz edilen amfibollere dayanan su içeriği tahminleri %3,7 ile %5,7 arasında değişmektedir.

Mineral kompozisyonlarını kullanarak yapılan termobarometrik hesaplamalar, çalışılan plütonik kayalarda geniş bir basınç (0,04-2,06 kbar) ve sıcaklık (712-824 °C) tahmin aralığı ortaya koymuştur (Çizelge 6 ve 7). Bu birleşik gözlemler, kabuğun görece sıg derinliklerinde, muhtemelen 1 ila 8 km aralığında, kıtasal kabuktan türemiş su zengini bir magmanın yerleştirildiğini önermektedir.

6. Sonuç

Kazıkbeli Plütonu, KD-GB yönünde uzanan, yaklaşık 46 km² alan kaplayan eliptik bir intrüzyondur. Gabroyik diyoriten granitlere kadar değişen bir litolojik çeşitlilik sergilemektedir. Plütonun kayaçları, plajiyoklaz (An_{26-66}), ortoklaz (Or_{80-97}), kuvars, amfibol, biyotit ve Fe-Ti oksitlerinden oluşmaktadır.

Kazıkbeli kayaçları, ince orta taneli, porfirik, poikilitik, bazen mikrolitik ve grafik dokular da dahil olmak üzere geniş bir dokusal spektrum göstermektedir. Amfibol bileşimleri Mg# değerinde (0,63-0,73) değişkenlik göstermekte ve biyotitlerin Mg# değeri ise 0,52 ile 0,58 arasında değişmektedir. Amfibol ve biyotit verilerinden hesaplanan

kristalleşme sıcaklıkları 712 °C ile 824 °C arasında değişmektedir. Basınç tahmini, yaklaşık 1 ila 8 km arasında, nispeten sıg kabuk derinliklerinde yerleşimi önermektedir ve değeri 0,04 ila 2,06 kbar arasında değişmektedir. Oksijen fugasitesi (fO_2) değeri ise -12,5 ile -13,8 arasında minimal bir değişim göstermektedir. Amfibollerden tahmin edilen su içeriği ise %3,7 ile %5,7 arasında değişmektedir.

Birleşik jeokimyasal ve dokusal verilere dayanarak, Kazıkbeli Plütonu'nun nispeten sıg kabuk derinliklerinde, muhtemelen yaklaşık 1 ila 8 km arasında, katılaştığı yorumlanmaktadır.

Katkı Belirtme

Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından bu araştırmaya 20.F5114.01.04 ve 22.F5114.02.03 proje koduyla finansal destek sağlanmış. Yazarlar, saha çalışmalarındaki değerli yardımları için Hüseyin Enes Atay, Muhammet Emin Ay ve Mertcan Yılmaz'a içten teşekkürlerini sunar ve makalenin kalitesini önemli ölçüde artıran yapıcı eleştirileri ve yorumları için editör Halim Mutlu, hakem Zafer Aslan ve iki anonim hakeme de minnettar olduklarını belirtirler.

Değinilen Belgeler

- Abbott Jr., R. N. 1985. Muscovite-bearing granites in the AFM liquidus projection. *Canadian Mineralogist*, 23, 553-561.
- Abdel-Rahman, A. M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas. *Journal of Petrology* 35, 525-541.
- Ağar, Ü. 1977. Demirözü (Bayburt) ve Köse (Kelkit) bölgesinin jeolojisi. Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul (yayımlanmamış).
- 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-in hornblende 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. ⁴⁰Ar-³⁹Ar 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 166, 113–142.
- Arslan, M., Temizel, İ., Ackerman, L., Yücel, C., Abdioğlu Yazar, E. 2022. Highly siderophile element and Os isotope systematics of the Cenozoic volcanic rocks from the Eastern Pontides, NE Turkey: Constraints on the origin and evolution of subcontinental mantle-derived magmas. *Lithos* 410–411.
- 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.
- Aydınçakır, E. 2014. The Petrogenesis of Early-Eocene non-adakitic volcanism in NE Turkey: Constraints on geodynamic implications. *Lithos* 208, 361-377.
- 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, 175–196.
- Aydınçakır, E., Yücel, C., Ruffet, G., Gücer, M. A., Akaryalı, E., Kaygusuz, A. 2022. Petrogenesis of post-collisional Middle Eocene volcanism in the Eastern Pontides (NE, Turkey): Insights from geochemistry, whole-rock Sr-Nd-Pb isotopes, zircon U-Pb and ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology. *Geochemistry* 125871. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2022.125871>.
- Aydınçakır, E., Yücel, C., Kaygusuz, A., Bilici, Ö., Yi, K., Jeong, Y-Z., Güloğlu, Z. S. 2023. Magmatic evolution of the Calc-alkaline Middle Jurassic igneous rocks in the Eastern Pontides, NE Turkey: insights from geochemistry, whole-rock Sr-Nd-Pb, in situ zircon Lu-Hf isotopes, and U-Pb geochronology. *International Geology Review* 65, 20, 3146–3167.
- 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.
- Boztuğ, D., Jonckheere, R., Wagner, G.A., Yeğingil, Z. 2004. Slow Senonian and fast Palaeocene–Early Eocene uplift of the granitoids in the Central eastern Pontides, Turkey: apatite fission-track results. *Tectonophysics* 382, 213–228.
- Boztuğ, D., Erçin, A. İ., Kuruçelik, M. K., Göç, D., Kömür, I., Iskenderoğlu, A. 2006. Geochemical characteristics of the composite Kaçkar batholith generated in a Neo-Tethyan convergence system, Eastern Pontides, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences* 27, 286–302. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.03.008>.
- Çoğulu, E. 1975. Gümüşhane ve Rize granitik plutonlarının mukayeseli petrojeolojik ve jeokronolojik etüdü. Unpublished Doctoral Thesis, İstanbul Tech. Univ.
- Couch, S., Sparks, R. S. J., Carroll, M. R. 2001. Mineral disequilibrium in lavas explained by convective self-mixing in open magma chambers. *Nature* 411, 1037-1039.
- Deer, W.A., Howie, R. A., Zussman, J. 1992. An introduction to the rock forming minerals, (second edition), London, Longman, p, 696.
- Dokuz, A. 2011. A 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., Sünnetçi, K. 2019. Jurassic acidic magmatism in a back-arc setting, eastern Sakarya Zone, Turkey: Geochemical constraints and an evolutionary model: *Lithos* 10.1016/j.lithos.2019.02.022.
- 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., 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* v. 33, p. 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*.
- Eyüboğlu, Y., Dudas, F. O., Santosh, M., Eroğlu-Gümrük, T., Akbulut, K., Yi, K., Chatterjee, N. 2018. The final pulse of the Early Cenozoic adakitic activity in the Eastern Pontides Orogenic Belt (NE Turkey): An integrated study on the nature of transition from adakitic to non-adakitic magmatism in a slab window setting. *Journal of Asian Earth Sciences* 157, 141–165.
- 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* 326–327, 39–70.
- Gedikoğlu, A. 1979. Harşit (Giresun-Doğankent) granit karmaşığının jeokronolojik etüdü. *Türkiye Jeoloji Bilimsel ve Teknik Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı*, 33, 59-60.
- Gücer, M. A., Sarı, E. 2021. Karbonifer Pamuktaş Plütönu'nun petrografisi, jeokimyası ve petrolojik özellikleri, Bayburt (KD Türkiye). *Yerbilimleri*, 41(2), 85-120.
- Güloğlu, Z. S. 2022. Eosen yaşlı Kazıkbeli Plütönu'nun (Kürtün-Gümüşhane) petrografisi, petrokimyası, U-Pb zirkon jeokronolojisi, tüm-kayaç Sr-Nd-Pb ve zirkon Lu-Hf izotop jeokimyası ve petrolojisi. Doktora tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gümüşhane (yayımlanmamış).
- Güven, İ. H. 1993. Doğu Pontidler'in 1/ 250 000 ölçekli kompilasyonu, Maden Teftik 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 $P_{H_2O}=5$ 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. *Contributions 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 calibration of aluminum in amphibole with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist* 72, 231-239.
- İlbeyle, N. 2008. Geochemical characteristics of the Sebinkarahisar granitoids in the Eastern Pontides, northeast Turkey: Petrogenesis and tectonic implications. *International Geology Review* 50, 563–582.
- Johnson, M. C., Rutherford, M. J. 1989. Experimental calibration of the aluminum in-hornblende geobarometer with application to Long Valley Caldera (California) volcanic rocks, *Geology* 17, 837-841.
- Karlı, O., Chen, B., Aydın, F., Şen, C. 2007. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the Eocene Dölek and Sariçiçek 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, I., Aydın, F., Chen, B., Kandemir, R., Wijbrans, 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., Ketenci, M., Uysal, İ., Dokuz, A., Aydın, F., Chen, B., Kandemir, R., Wijbrans, J. 2011. Adakite-like granitoid porphyries in the Eastern Pontides, NE Turkey: Potential parental melts and geodynamic implications. *Lithos* 127, 354–372.
- 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 Sıldağı pluton, NE Turkey: magmatic response to continental lithospheric thinning. *Journal of Asian Earth Sciences* 51, 45-62.
- 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* 172, 31.

- Kaygusuz, A. 2000. Torul ve çevresinde yüzeylenen kayaların petrografik ve jeokimyasal incelenmesi, Yayınlanmamış doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kaygusuz, A., Öztürk, M. 2015. Geochronology, geochemistry, and petrogenesis of the Eocene Bayburt intrusions, Eastern Pontides, NE Turkey: Evidence for lithospheric mantle and lower crustal sources in the high-K calc-alkaline magmatism. *Journal Asian Earth Sciences* 108, 97–116.
- Kaygusuz, A., Şahin, K. 2016. Petrographical, geochemical and petrological characteristics of Eocene volcanic rocks in the Mescitli area, Eastern Pontides (NE Turkey), *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 5 (2), 473-486.
- Kaygusuz, A., Siebel, W., Şen, C., Satır, M. 2008. Petrochemistry and petrology of I-type granitoids in an arc setting: The composite Torul pluton, Eastern Pontides, NE Turkey. *International Journal Earth Sciences* 97, 739–764 .
- Kaygusuz, A., Arslan, M., Siebel, W., Şen, C. 2011. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of post-collisional calc-alkaline volcanics in the eastern pontides (NE Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences* 20, 137–159.
- Kaygusuz, A., Arslan, M., Siebel, W., Sipahi, F., İlbeyli, N. 2012. Geochronological evidence and tectonic significance of Carboniferous magmatism in the southwest Trabzon area, eastern Pontides, Turkey. *International Geology Review* 54, 1776–1800.
- 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., Merdan Tutar, Z., Yücel, C. 2017. Mineral chemistry, crystallization conditions and petrography of Cenozoic volcanic rocks in the Bahçecik (Torul/Gümüşhane) area, Eastern Pontides (NE Turkey). *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 6 (2), 641-651.
- Kaygusuz, A., Yücel, C., Arslan, M., Sipahi, F., Temizel, İ., Çakmak, G., Güloğlu, Z. S. 2018. Petrography, mineral chemistry and crystallization conditions of Cenozoic plutonic rocks located to the north of Bayburt (Eastern Pontides, Turkey). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 157, 75–102.
- Kaygusuz, A., Yücel, C., Arslan, M., Temizel, İ., Yi, K., Jeong, Y. J., Siebel, W., Sipahi, F. 2020. Eocene I-type magmatism in the Eastern Pontides, NE Turkey: Insights into magma genesis and magma-tectonic evolution from whole-rock geochemistry, geochronology and isotope systematics. *International Geology Review* 62, 1406–1432.
- Kaygusuz, A., Arslan, M., Temizel, İ., Yücel, C., Aydınçakır, E. 2021. U–Pb zircon ages and petrogenesis of the Late Cretaceous I-type granitoids in arc setting, Eastern Pontides, NE Turkey. *Journal of African Earth Sciences* 174, 104040.
- Kaygusuz, A., Yücel, C., Aydınçakır, E., Gücer, M. A., Ruffet, G., 2022. ⁴⁰Ar–³⁹Ar dating, whole-rock and Sr-Nd isotope geochemistry of the Middle Eocene calc-alkaline volcanic rocks in the Bayburt area, Eastern Pontides (NE Turkey): Implications for magma evolution in an extension-related setting. *Mineralogy and Petrology* 116, 379–399.
- Kaygusuz, A., Güloğlu, Z. S., Aydınçakır, E., Yücel, C., Vural, A., Siebel, W., Jeong, Y-J. 2023. U–Pb zircon dating, Sr-Nd whole-rock and Lu-Hf zircon isotope analyses of the Eocene Arslandede pluton, Eastern Pontides, NE Turkey: Implications for mantle source and magma evolution. *Chemie der Erde- Geochemistry*.
- Kemp, A. I. S. 2001. Petrogenesis of granitic rocks: A source-based perspective. PhD Thesis, Australian National University, Canberra, Australia (unpublished).
- 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.
- 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., Nickhel, 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 Mineralogy*, 9, 623-651.
- Liu, Z., Zhu, D. C., Wang, Q., Eyüboğlu, Y., Zhao, Z. D., Liu, S. A., Xu, L. J. 2018. Transition from low-K to high-K calc-alkaline magmatism at approximately 84 Ma in the Eastern Pontides (NE Turkey): Magmatic response to slab rollback of the Black Sea. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 123, 7604–7628.
- 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 geohygrometer: Application to Mount St. Helens and other dacitic magmas, *Geology* 12, 587-590.
- Moazzen, M., Droop, G. T. R. 2004. Application of mineral thermometers and barometers to granitoid igneous rocks: The etive complex, W Scotland. *Mineralogy and Petrology* 83, 27-53.
- Naney, M.T. 1983. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems, *American Journal of Science* 283, 993-1033.
- Nielsen, C.H., Sigurdsson, H. 1981. Quantitative methods for electron microprobe analysis of sodium in natural and synthetic glasses. *American Mineralogist* 66(5-6), 547-552.
- Nixon, G.T. 1988. Petrology of the younger andesites and dacites of Iztaaccihuatl volcano, Mexico: Disequilibrium phenocryst assemblages as indicators of magma chamber processes. *Journal of Petrology* 29, 213-264.
- Oğuz-Saka, S., Aydın, F., Karşlı, O., Dokuz, A., Aiglsperger, T., Miggins, D. P., Şen, C., Kandemir, R., Sarı, B., Koppers, A. A. P. 2023. Two-stage bimodal volcanism in a Late Cretaceous arc/back-arc setting, NE Turkey: Constraints from volcano-stratigraphy, zircon U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and whole-rock elemental and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *Lithos*.
- Okay, A., Şahintürk, Ö. 1997. Geology of the eastern Pontides. In: Robinson AG (Ed.) *Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region*. American Association of Petroleum Geologists Memoirs 68, 291-311.
- Özdamar, Ş. 2016. Geochemistry and geochronology of late Mesozoic volcanic rocks in the northern part of the Eastern Pontide Orogenic Belt (NE Turkey): Implications for the closure of the Neo-Tethys Ocean. *Lithos* 248-251, 240-256.
- 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 Neo-Tethys Ocean: Insights from geochemistry, geochronology and Sr-Nd isotopes. *Lithos* 284-285, 477-492.
- Parsons, I., Mason, R. A., Becker, S. M., Finch, A. A. 1991. Biotite equilibria and fluid circulation in the Klokken Intrusion. *Journal of Petrology* 32, 1299-1333.
- 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 rock. *Journal of Petrology* 44, 733-756.
- Revan, M.K., Demir, Y., Uysal, İ., Özkan, M., Dumanlılar, Ö., Şen, C., Kara, R. T., Hamzaçebi, S., Göç, D., Müller, D., Tokoğlu, M. 2023. Recently-discovered Bahçecik Au±Ag mineralization in the Eastern Pontides, Gümüşhane-NE Türkiye: Geological and geochemical implications on the intermediate sulfidation epithermal deposit. *International Geology Review*.
- Rezeau, H., Hässig, M., Sadikhov, E., Chiaradia, M., Moritz, R. 2023. Magmatic record along the Eastern Pontides-Lesser Caucasus orogenic belt: Implications for magma petrogenesis, regional tectonics and metallogeny. *Earth-Science Reviews*.
- Ridolfi, F., Renzulli, A. 2012. Calcic amphiboles in calc-alkaline 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 volcanos, *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.
- Sakumaya, M. 1981. Petrological study of the Myoko and Kurohime Volcanoes, Japan: Crystallization sequence and evidence magma mixing. *Journal of Petrology* 22, 553-583.
- Sar, A., Kürüm, S., Bingöl, A. F. 2023. Early Cretaceous to Middle Eocene magmatic evolution of Eastern Pontides: Zircon U-Pb ages and Hf isotopes, and geochemical and Sr-Nd isotopic constraints from multiphase granitoids, NE Turkey. *Journal of Earth Science* 34, 2, 518-535.
- Schmidt, M. W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende 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 from magma mixing. *Canadian Mineralogist* 34, 411-442.
- Sipahi, F., Akpınar, İ., Saydam Eker, Ç., Kaygusuz, A., Vural, A., Yılmaz, M. 2017. Formation of the Eğrikar (Gümüşhane) Fe–Cu skarn type mineralization in NE Turkey: U–Pb zircon age, litho-geochemistry, mineral chemistry, fluid inclusion, and O–H–C–S isotopic compositions. *Journal of Geochemical Exploration* 182, 32–52.
- Smith, J. V., Brown, W. L. 1988. Feldspar minerals I: Crystal structures, physical, chemical, and microtextural properties, Springer Verlag, New York.
- Speer, J. A. 1984. Micas in igneous rocks, Micas, *Reviews in Mineralogy*, ed: Bailey S.W, 13, 299-35.
- 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 Geochemical Soc, Rev Mineral* 595-622.
- Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Reviews* 12, 1–33.
- 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, E., Arslan, M., Kaygusuz, A., Arslan, Z. 2018. Mineral chemistry, whole-rock geochemistry and petrology of Eocene I-type shoshonitic plutons in the Gölköy area (Ordu, NE Turkey). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 157, 121–152.
- Temizel, İ., Arslan, M., Yücel, C., Abdioğlu Yazar, E., Kaygusuz, A., Arslan, Z. 2019. U–Pb geochronology, bulk-rock geochemistry and petrology of Late Cretaceous syenitic plutons in the Gölköy (Ordu) area (NE Turkey): Implications for magma generation in a continental arc extension triggered by slab roll-back. *Journal Asian Earth Sciences* 171, 305–320.
- Temizel, İ., Arslan, M., Yücel, C., Abdioğlu Yazar, E., Kaygusuz, A., Arslan, Z. 2020. 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* 62, 1131–1158.
- Temizel, İ., Arslan, M., Abdioğlu Yazar, E., Arslan, Z., Kaygusuz, A., Baki Eraydın, T. 2022. Zircon U–Pb geochronology and petrology of the tholeiitic gabbro from the Kovanlık (Giresun) area: Constraints for the Late Cretaceous bimodal arc magmatism in the Eastern Pontides Orogenic Belt, NE Turkey. *Lithos* 428–429. Toksoy-Köksal, F. 2016. Ekecidağ Magmatik Birliği (Orta Anadolu) Granitoidlerinin Petrojenezisi: Mineral Kimyası Perspektifi. *Yerbilimleri* 37(2), 139-178.
- Topuz, G., Altherr, R., Schwarz, W. H., Siebel, W., Satir, M., Dokuz, A. 2005. Post-collisional plutonism with adakite-like signatures: The Eocene Saraycik granodiorite (Eastern Pontides, Turkey). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 150, 441–455.
- Topuz, G., Altherr, R., Siebel, W., Schwarz, W.H., Zack, T., Hasözbeke, A., Barth, M., Satir, 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. I., Altherr, R., Schwarz, W. H., Siebel, W., Zack, T., Satir, M., Şen, C. 2011. Post-collisional adakite-like magmatism in the Agvanis 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 Palaeozoic–Mesozoic plutons from western New Zealand estimated by hornblend–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., Ustaömer, P. A., Gerdes, A., Peytcheva, I. 2013. Constraints on Variscan and Cimmerian magmatism and metamorphism in the Pontides (Yusufeli–Artvin area), NE Turkey from U–Pb dating and granite geochemistry. *Geological Society Special Publication* 372, 49–74.
- Venezky, D. Y., Rutherford, M. J. 1997. Pre-eruption conditions and timing of dacite-andesite magma mixing in the 2.2 ka eruption at Mount Rainier. *Journal Geophys Res.* 102, 20069-20086.
- Vural, A., Kaygusuz, A. 2021. Geochronology, petrogenesis and tectonic importance of Eocene I-type

- magmatism in the Eastern Pontides, NE Turkey. *Arabian Journal of Geosciences* 14. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06884-z>.
- Wallace, P. J., Carmichael, I. S. E. 1994. Petrology of Volcan Tequila, Jalisco, Mexico: disequilibrium phenocryst assemblages and evolution of the subvolcanic magma system. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 117, 345-361.
- Wones, D. R. 1989. Significance of the assemblage titanite, magnetite, quartz in granitic rocks. *American Mineralogist* 74, 744-749.
- Yılmaz, Y. 1972. Petrology and structure of the Gümüşhane Granite and surrounding rocks, North-Eastern Anatolia. PhD Thesis, Univ. London 260 p.
- Yücel, C., Arslan, M., Temizel, İ., Abdioğlu Yazar, 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.
- Yücel, C., Aydınçakır, E., Kaygusuz, A., Arslan, M., Yi, K., Jeong, Y-J., Cicerali, D. 2023. Petrogenesis of Late Cretaceous A-type plutonic rocks from the Eastern Pontides Orogenic Belt (NE Turkey): constraints from zircon U-Pb geochronology, zircon Lu-Hf and whole-rock Sr-Nd-Pb-Hf isotopes. *International Geology Review*.