

Bu makale aşağıda atfı bilgisi verilen makalenin Türkçe çevirisidir.  
Atfı bilgisi: Alexander, G. T., 2024. Porphyry and epithermal Au-Cu systems of the Southern Caucasus and Northern Iran. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 174, 37-53. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1394073>



## Maden Tetkik ve Arama Dergisi

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



### Güney Kafkasya ve Kuzey İran'da porfiri ve epitermal altın-bakır sistemleri

#### *Porphyry and epithermal Au-Cu systems of the Southern Caucasus and Northern Iran*

Alexander G. TVALCHRELIDZE<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Maden Kaynakları Enstitüsü, Tiflis Devlet Üniversitesi, Tiflis, Gürcistan

Araştırma Makalesi

#### Anahtar Kelimeler:

Epitermal, Porfiri, Altın, Bakır, Paleotermal Alan.

#### ÖZ

Bu makale, porfiri bakır ve epitermal altın sistemlerinin tek bir polijenik yatak içinde bir arada bulunduğuna dair somut jeolojik kanıtlar ve bunun kökenine dair paleotermofiziksel bir model sunmaktadır. Güney Kafkasya ve Kuzey İran'ın metalojenik analizi, bu tür yatakların uzun ömürlü kalk-alkali ada yaylarıyla sınırlı olduğunu ve orojenez sırasında oluştuğunu göstermiştir. Bu çalışmada, karmaşık yataklardan olan Sonajil (İran), Gharta ve Merisi (Gürcistan) yatakları örnek olarak gösterilmiştir. Araştırmalar, porfiri ve epitermal cevher oluşumunun bir arada gerçekleşmesi için bazı ön koşulların var olması gerektiğini göstermektedir: (i) Dış ortamın termodinamiğini aşan anormal enerji kaynağı; (ii) İçsel ve meteorik bileşenlerden oluşan sıvının akışını belirleyen sıcaklık değişimi (cevher damarlarının tekrarlı biçimde zonlanmasıyla oluşan); (iii) Bu koşulların sülfür cevheri oluşumu sürecindeki istikrarıdır. Ancak, bu şekildeki bir sülfürlü cevher oluşum süreci yüksek sülfidasyon altın yataklarının oluşumunu açıklayamaz. Serbest altının kütleli çökelişi, hidrotermal alterasyona uğramış kayaların oluşumundan sonra cevher kanalında freatik çökmeyi gerektirir. Bu olay genellikle yapboz (jigsaw-fit) dokulu hidrotermal breşlerin, ana kayaların ve hidrotermal olarak altere olmuş kayaların altın içeren bir kuvars hamuru ile çimentolandığı breşleşmiş boşluklu (vuggy) silika ile temsil edilir.

Geliş Tarihi: 24.04.2023

Kabul Tarihi: 21.11.2023

#### Keywords:

Epithermal, Porphyry, Gold, Copper, Paleothermal Field.

#### ABSTRACT

This article presents tangible geological evidence for the coexistence of porphyry copper and epithermal gold systems within single polygenic deposits and provides a paleotermophysical model for their origins. A brief metallogenetic analysis of the Southern Caucasus and Northern Iran has shown that such deposits are confined to long-living calc-alkaline island arcs and were formed during their orogenesis. Examples of complex Sonajil (Iran), Gharta, and Merisi (Georgia) deposits are considered. The investigation has shown that for combined porphyry and epithermal ore formation, some preconditions are suggested to exist: (i) a source of anomalous energy that exceeds the thermodynamics of the enclosing environment; (ii) the existence of a temperature gradient that determines conventional flows of fluids composed of endogenous and meteoric constituents (proven by rhythmical zoning of ore lodes); (iii) the stability of such conditions for a period of sulfide ore formation. However, such a process of sulfide ore formation cannot explain the formation of high sulfidation gold deposits. The precipitation of native gold requires phreatic collapse in the ore conduit channel, already after the formation of hydrothermally altered rocks, and this event results in the creation of either hydrothermal breccias often with jigsaw-fit texture or brecciated vuggy silica where host rocks and hydrothermally altered rocks are cemented by a gold-bearing quartz matrix.

\*Başvurulacak yazar: Alexander G. TVALCHRELIDZE, [sandrotval@gmail.com](mailto:sandrotval@gmail.com)

## 1. Giriş

Geçen yüzyılın sonu ve yeni yüzyılın başı ile birlikte, Güney Kafkasya ve Kuzey İran'ın yanı sıra tüm Tetis Kuşağı'ndaki altın, bakır ve polimetalik mineralizasyonun metalojenik ortamı ve oluşumu hakkındaki fikirlerimiz önemli ölçüde değişmiştir. Önceleri farklı cevher oluşumu süreçlerinin belki de eşzamanlı ama ayrı ürünlerini temsil ettikleri öne sürülürken, günümüzde ise ortak bir köken tarafından birleştirilen ve ana magmatik sokulumlardan farklı mesafelerle ayrılan yataklar olarak kabul edilmektedirler. Örneğin, Güney Kafkasya altın ve baz metal yatakları, Kuroko tipi volkanojenik altın ve baz metal masif sülfid, hidrotermal altın ve polimetalik damar yatak ve porfiri bakır ağsal (altınlı veya altınsız) literatürde yer alan standart şekliyle sınıflandırılmıştır (Tvalchrelidze, 1980 ve 1984). Bu yaklaşımlar, mevcut önkoşullara dayandığı için yeni keşif olasılığını önemli ölçüde sınırlandırmıştır. Sonuç olarak, bölgesel benzerliğe sahip ülkelerin kaynakları tükenmeye başlamıştır. Örneğin, 2000'li yılların başında Türkiye'nin altın kaynaklarının son derece sınırlı olduğu ve yeni keşifler için beklenti olasılığının düşük olduğu ileri sürülmüştür (Engin, 2003).

Düşük, ortaç ve yüksek sülfidasyon epitermal altın yataklarının tanımlanması, tipomorfik özelliklerinin araştırılması ve aranması ile keşifler için kapsamlı bir metodolojinin detaylandırılması (Arribas, 1995; Hedenquist, 2000; Goldfarb vd., 2001; Payot vd., 2005; John vd., 2018; Wang vd., 2019), Türkiye'de (Oyman vd., 2003; Diarra vd., 2019; Aluç vd., 2020; Gülyüz vd., 2020), Küçük Kafkasya'da (Bogdanov vd., 2013; Moritz vd., 2017; Veliyev vd., 2018; Imamverdiyev vd., 2021) ve İran'da (Mehrabi vd., 2008; 2014; Aghazadeh vd., 2015; Heidari vd., 2015; Sholeh vd., 2016) yeni altın yataklarının hızla keşfedilmesine de katkı sağlamıştır. Bu keşifler, ilgili ülkelerin ekonomik kalkınmaları için hayati önem taşıyan kaynakları geliştirmeleri açısından son derece önemli olmuştur (Tvalchrelidze, 2003). Buna paralel olarak, örneğin Türkiye'de madencilik mevcut statüsü önemli ölçüde iyileştirilmiştir (Ersoy, 2022; Hastorun, 2022).

Yeni metalojenik modeller, epitermal veya porfiri yatakların, yitim zonu ve orojenik aşamalarda kalk-alkali ada yaylarının gelişimiyle ilişkili olduğu

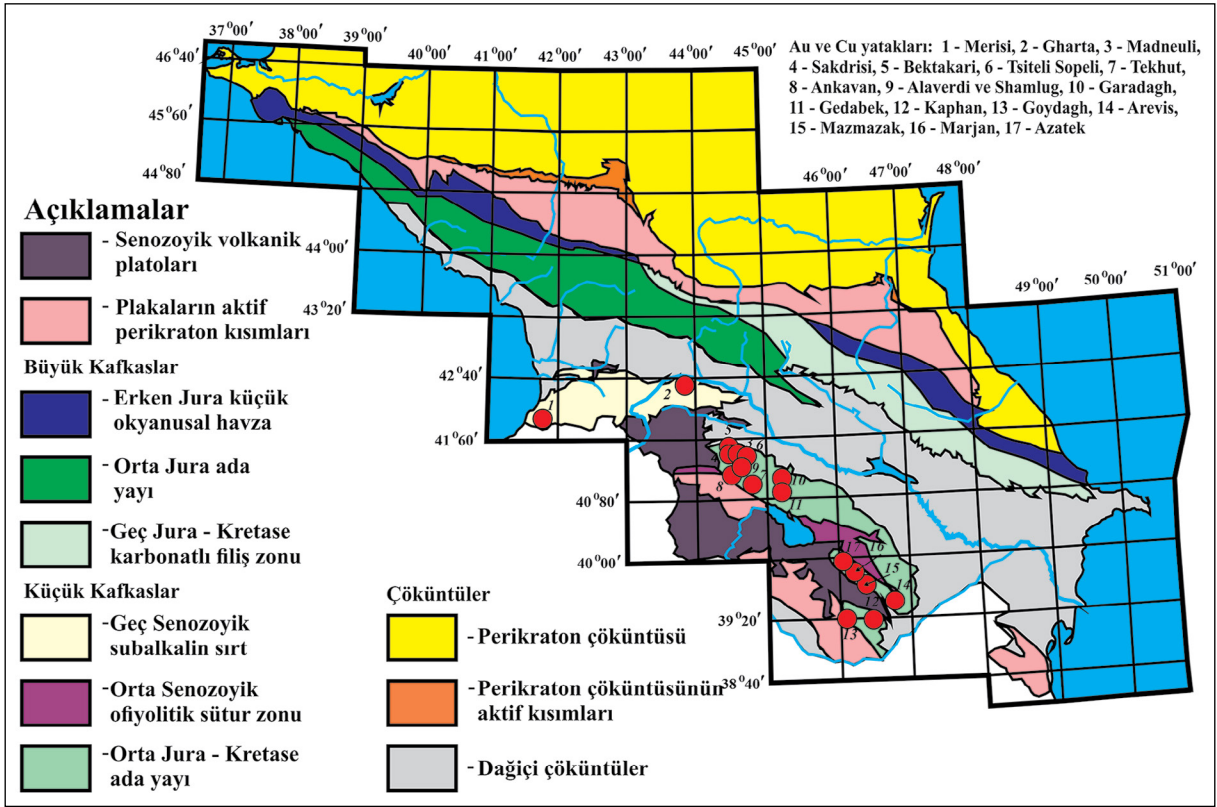
kanıtlanmıştır (Yiğit, 2006, 2009; Mederer vd., 2013; Moritz vd., 2016).

Bu nedenle, kural olarak, porfiri ve epitermal yatakları, aralarındaki olası genetik ilişkiye dikkat edilmeden ayrı ayrı tanımlanmaktadır (Ghaderi vd., 2018; Kuşcu vd., 2019). Bu mineralizasyon türleri için ayrı ayrı modeller bile oluşturulmuştur (Sinclair, 2007; Taylor, 2007; Berger vd., 2008; John, 2010; John vd., 2018) Genel olarak bu modeller, dünya ölçeğindeki klasik madenlerin tipomorfik özelliklerine dayanmaktadır (Boomeri, vd., 2010). Ayrıca Sillitoe, 2000'de porfiri bakır ve epitermal altın mineralizasyonunun genetik birliğinin ana hatları çizilmiştir. Takip eden yıllarda, porfiri bakır cevherleşmelerinde altın varlığına dair pek çok bulgu yayınlanmıştır (Shafiei ve Shahabpour, 2008; Hajalilou ve Aghazadeh, 2016). Ancak porfiri ve düşük, ortaç ve yüksek sülfidasyon epitermal sistemlerin iç içe geçmiş ve üst üste konumlanmış gerçek ve doğal örneğinin açıklaması son derece nadirdir. Bu tür sistemlerin kapsamlı, sayısal modeline rastlanmamıştır. Bu nedenle bu makalede hem bu tür sistemlerin bir arada var olduğuna dair somut jeolojik kanıtlar sunulacak olup hem de oluşumları için uygun bir paleotermofiziksel model sunmaya çalışılacaktır.

## 2. Epitermal ve Porfiri Sistemlerin Metalojenik Ortamı

### 2.1. Güney Kafkasya

Kafkasya'daki epitermal altın ve porfiri bakır ( $\pm$  altın) sistemlerinin dağılımı Şekil 1'de görülmektedir. Yatakların Küçük Kafkasya'da benzersiz bir şekilde dağıldığı ve iki tektonik bölgeyle sınırlı olduğu görülebilir. Bunlardan ilki, Gürcistan'dan Türkiye'ye kadar uzanan Geç Senozoyik rift zonudur (Acara-Trialeti zonu olarak adlandırılır) (Adamia vd., 2011). Bu zon, Geç Alpin Orojenezi döneminde (Paleojen-Neojen) doğrudan Transkafkasya Medyan Kütlesi'nin (mikroplaka) Kretase örtüsü üzerinde ortaya çıkmıştır ve günümüzde dağlar arası geçişle kesilmektedir (Adamia vd., 1981). Bu zon içerisinde Neojen bazalt-andezit-riyolit volkanizması riftin doğu kenarından (tüflü kumtaşları ve killerin sıra dağları oluşturduğu ortam) batıya doğru genişler (tüfitlerle iç içe katmanlı riyodasitik ve riyolitik volkanik konilerin, tipik bazaltik ve andezitik volkanik akıntıları takip ettiği ortam). Aynı doğrultuda afinitenin alkalinitesi



Şekil 1- Kafkasya'daki en önemli porfiri bakır (± altın) ve yüksek, ortaç ve düşük sülfidasyon altın yataklarının dağılımı. Metalojenik zonlanma haritası, Adamia vd. (2011) tarafından düzenlenmiştir.

de giderek artmaktadır. Geç Neojen'de, bahsedilen riftin tektonik olarak daha aktif olan orta ve batı kısımlarındaki kuvars diyorit ile kuvars monzonit masifleri intrüzyona uğramıştır. Orojenez burada Neojen sonunda, Kuvaterner'den hemen önce meydana gelmiştir. Tanımlanan volkanik ve plutonik afinite, yüksek sülfidasyon altın mineralizasyonu veya ortaç sülfidasyon altın-polimetallik epitermal ile birlikte porfiri bakır tipi cevherleşme belirtilerini taşıyan birkaç tipomorfik yatağı barındırmaktadır. Bu mineralizasyon türleri aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

İkinci zon - Orta Jura-Kretase Ada yayı - küresel ölçekte Somkhito-Karabağ kuşağı olarak bilinmektedir (Tvalchrelidze, 1980; 1984). Bu volkanik kuşak Ermenistan, Azerbaycan, Gürcistan topraklarını kapsar ve Türkiye ötesine doğru devam etmektedir. Senozoyik (Erken Kuvaterner) andezit-bazaltik naplarla kaplanmıştır. Bu bölgenin modern metalojenik modeli İsviçreli, Gürcü, Ermeni ve Azeri jeologlardan oluşan uluslararası bir ekip tarafından geliştirilmiştir (Mederer vd., 2013; Richards, 2015; Moritz vd., 2016; 2017).

Burada cevher taşıyan iki adet volkanik-plutonik afinite gelişmiştir. Orta Jura kayaları doğrudan Transkafkasya kristal temeli üzerinde yer almaktadır. Seri, Paleozoyik yaşlı granitlerin üzerine yerleştiği bazal konglomera ile başlar. Ermenistan ve Azerbaycan'da, kalın bir kalk-alkali sualtı andezitik volkanik-sedimanter serisi gelişmiştir. Ancak kuzeybatıya, Gürcistan'a doğru, bu ada yayı afinitesinin kalınlığı azalmaktadır ve Orta Jura volkanizmasının izleri daha az belirgin hale gelmektedir. Bu afinite içerisinde Bathoniyen dönemde devasa kuvars diyorit kütleleri yerleşmiştir. Bunlardan biri olan Shnokh-Kokhpb masifi, 460 milyon ton cevher rezervi ve %0,35 bakır tenörü ile dünya çapında Tekhut Altın-Bakır porfiri madenini (Şekil 1'de 7 numara) kontrol eder (Marutani, 2003). Ermenistan ve Azerbaycan'daki Kretase çökelleri sadece yetersiz kalınlıktaki kireçtaşlarıyla temsil edilmektedirler.

Diğer taraftan Kretase kayalarının kalınlığı Gürcistan'a doğru keskin bir şekilde artmıştır. Burada cevher içeren kalın bir Kretase yaşlı andezitik

(minör bazalt-andezit-dasit-riyolit) kalk-alkali formasyon, çok sayıda merkez- tip volkan ve ara volkanik alanlarda geniş, asidik, sualtı piroklastik alanlar oluşturmuştur. Bu seri özellikle ülkenin altın ve bakır rezervinin büyük çoğunluğuna ev sahipliği yapan Bolnisi Maden Bölgesi'nde oldukça kalındır (1-1,5 km'ye kadar) (Şekil 1'de no 3-6). Seri, cevher oluşumundaki önemi aşağıda tartışılan birkaç kuvars diorit kütlelerinin sokulumu ile ortaya çıkmıştır.

Bolnisi Maden Kuşağı'ndaki yataklar arasında en büyüğü 93,1 milyon ton birincil cevher rezervi ve metal stoğu ile Madneuli ortaç sülfidasyon yatağıdır. Bu bölge 542 bin ton bakır, 79,8 bin ton çinko, 8,2 bin ton kurşun, 134 ton gümüş ve 53,8 ton altına sahiptir (Tvalchrelidze, 2003). Maden, Gürcistan'daki bakır ve altının temel üreticisidir.

Hem Orta Jura hem de Kretase volkanik-plutonik afinitelerinin petrolojisi yaklaşık 35 yıl önce ayrıntılı olarak tanımlanmıştır (Tvalchrelidze, 1987).

## 2.2. Kuzey İran

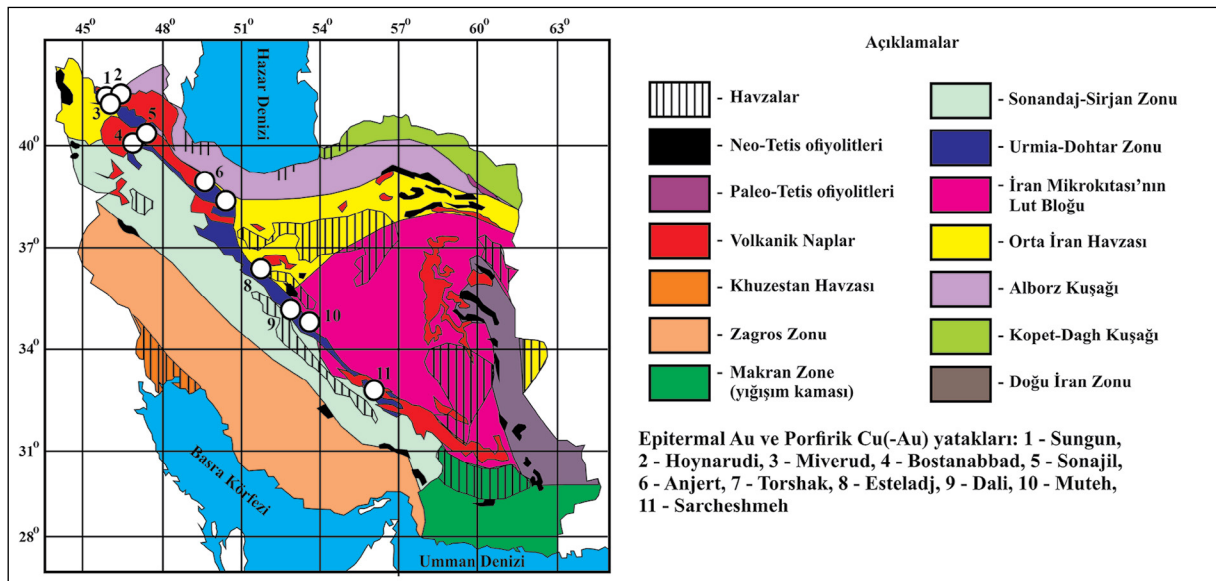
Şekil 2, öncelikli olarak İran'daki yüksek sülfidasyon altın yataklarını ve bazı tipomorfik porfiri bakır ( $\pm$  altın) dağılımını analiz etmektedir. Bu yataklar arasında 861 milyon ton geri kazanılabilir cevher rezervine ve %0,6 bakır tenörüne sahip Sungun (Şekil 2'de 1 numara) (Hosseini vd., 2017) ve 1.538

milyon ton cevher rezervine ve %0,58 bakır tenörüne sahip Sarcheshmeh (Şekil 2'de 11 numara) (Boomeri vd., 2010) gibi dünya standartlarında madenler bulunmaktadır.

Şekil 2'de istisnasız tüm tipomorfik yatakların Urmie-Dohtar metalojenik bölgesiyle ilişkili olduğu görülebilir. Buzon, Geç Neojen ve Erken Kuvaterner'de orojenez geçirmiş olan andezitik bir ada yayını temsil etmektedir. 1980'li yıllarda Sakhand ve Sabalan gibi hala aktif volkanlarla orojenik magmatizmanın son derece kapsamlı gelişimi anlaşılammıştı (Berberian ve King, 1981) ancak bugün bu bölgenin hala İran mikrokotası altında devam eden dalma-batmaya maruz kaldığı açıktır (Kaviani vd., 2009).

Kuzey İran'da Urmie-Dohtar bölgesi Erken Kuvaterner bazaltik napları ile örtüşmekte ve kuzeyde Alborz magmatik kuşağı ve güneybatıda Sonandaj-Sirjan metamorfik kuşağı ile sınırlanmaktadır. Sonucusu, Alpin zamanından önce orojenez ve metamorfizma geçirmiş bir rift bölgesini temsil etmektedir (Kaviani vd., 2009; Richards, 2015).

Bu nedenle, hem Güney Kafkasya'da hem de Kuzey İran'da porfiri bakır-altın ve epitermal cevher oluşturan sistemler, orojenik magmatizmanın aktif gelişiminin ardından nispeten sürekli dalma-batma geçiren uzun ömürlü ada yaylarıyla ilişkilidir. Kural olarak, bu sistemler kendine has porfiri, yüksek,



Şekil 2- İran'daki tipomorfik porfiri Cu ( $\pm$  Au) ve epitermal altın yataklarının dağılımı. Metalojenik zonlanma haritası Kaviani vd. (2009)'den modifiye edilmiştir.



orta ve düşük sülfidasyon yatakları oluşturur ancak yataklar farklı mineralizasyon türlerinin özelliklerini taşımaktadır. Aşağıda bu tür örnekler ele alınmaktadır.

### 3. Cevher Oluşturma Sistemlerinin Kombinasyonu

#### 3.1. Porfiri ve Yüksek Sülfidasyon Sistemleri - Sonajil Yatağı, Kuzey İran

Sonajil Yatağı, İran'ın Doğu Azerbaycan Eyaleti'nde, Heris şehri yakınlarında, eyalet başkenti Tebriz'e 85 km mesafede yer almaktadır. Bu yatak, uluslararası ekibimiz tarafından araştırılmış ve araştırılmaya devam etmektedir.

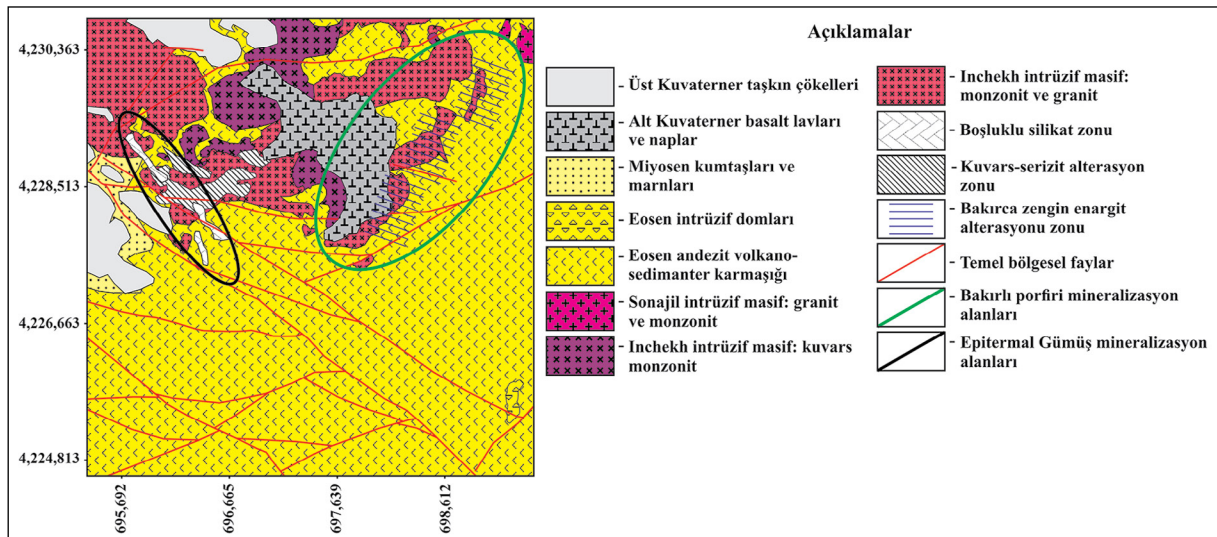
Bugün itibariyle, yüksek sülfidasyon altın cevherlerinin geri kazanılabilir rezervleri tahmin edilmiştir ve altın üreten açık ocak madenleri, yığın ve karbon süzdürme (liç) (CIL) tesisi yapım aşamasındadır. Altın içeren sahanın kaynak tahmin miktarı 7,6 milyon ton civarındadır ve 361 bin troy onz metal ile 1,5 g/t altın tenörü barındırmaktadır. Porfiri bakır cevherleri şu anda kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Açılan 12 sondaj kuyusunun tamamı ortalama %0,4 bakır tenörlü porfiri-tip cevherleşme kesmiştir. Bugün, araştırılan dikey cevherleşme aralığı 600 m'yi aşmaktadır. Sondaj kuyularında ticari tenörlerde altın varlığının ilk bulgularına rastlanmıştır.

Şekil 3, Sonajil yatağının model jeolojik haritasını göstermektedir. Yatağın jeolojik yapısı yeterince karmaşıktır. Jeolojik kesit, bazalt ve andezit lavları,

aynı bileşime sahip volkanik breşler, tüfler ve tüflü volkanik-sedimenter kayalardan oluşan bazalt-andezitik karakterli Eosen volkanik birimleri ile başlar. Bu birimlerin yüksek kısımlarında Miyosen yaşlı kumtaşları ve marnlar yer alır. Tüm seri, arazinin en yüksek hipsometrik seviyesini kaplayan bazalt ve dolerit bileşimli Erken Kuvaterner volkanik akıntısı ile son bulur.

Eosen volkanik birimlerine iki aşamalı magmatik kompleks sokulum yapmıştır. Bölgenin orta kesiminde Inchekh sokulumuna ait iki fazının yüzlekleri gözlenmektedir. İlk evre alkali kayalar yani monzonit ve siyenitlerden oluşurken, ikinci evre kalk-alkali kuvars monzonit ve mikrodioritlerden oluşmaktadır. Kayalar porfiri yapıya sahiptir ve bir volkan kökenli oldukları hakkında varsayım yapılabilir. Daha genç olan Sonajil intrüzyon evresi iyi tanımlanmış yariderinlik karaktere sahiptir, mika granitler ve monzonitlerle temsil etmektedir.

Yatak iki bölümden oluşmaktadır. Yüksek sülfidasyon epitermal altın mineralizasyonu sahası, porfiri bakır sahasından 4,5 km uzaklıkta, daha güney-batıda yer almaktadır. Sahanın cevher taşıyan yapısı, kuzey-batıya doğru bir eğilim gösterir (azimut 320-340°), uzunluğu yaklaşık 1.400 m, genişliği 10 ile 50 m arasında ve batı-güney-batıya doğru eğim açısı 45-60° arasındadır. Cevherleşme, yüzeyden 200 m derinliğe kadar izlenmektedir. Saha içinde altın içeren kütle, hidrotermal olarak altere olmuş (kuvars + serisit)



Şekil 3- Sonajil yatağının jeolojik haritası.

andezit parçalarının gri kuvars ile çimentoladığı bir hidrotermal breş ile temsil edilmektedir. Breşlerin kuvars (nadiren kalsit ile birlikte) matrisi yüzeyden itibaren büyük bir kalınlığa (200 m'den fazla) sahiptir. Breş, kökeni birçok yayında ayrıntılı olarak açıklanan yapboz dokusundadır (Şekil 4a) (Cas vd., 2011).

Yatağın kuzeydoğu kesiminde yer alan porfiri bakır sahası, hidrotermal olarak altere olmuş (kuvars + enargit) intrüzif kayaçlarda, esas olarak hem Inchekh hem de Sonajil intrüzif kütlelerinin diyoritlerinde tipik orta tenörlü cevherleşme ile temsil edilmektedir (Şekil 4b). Maden yatağı, dünya çapında bir bakır-altın yatağı keşfetme olasılıklarının çok yüksek olması nedeniyle kapsamlı bir sondaj programı altındadır.

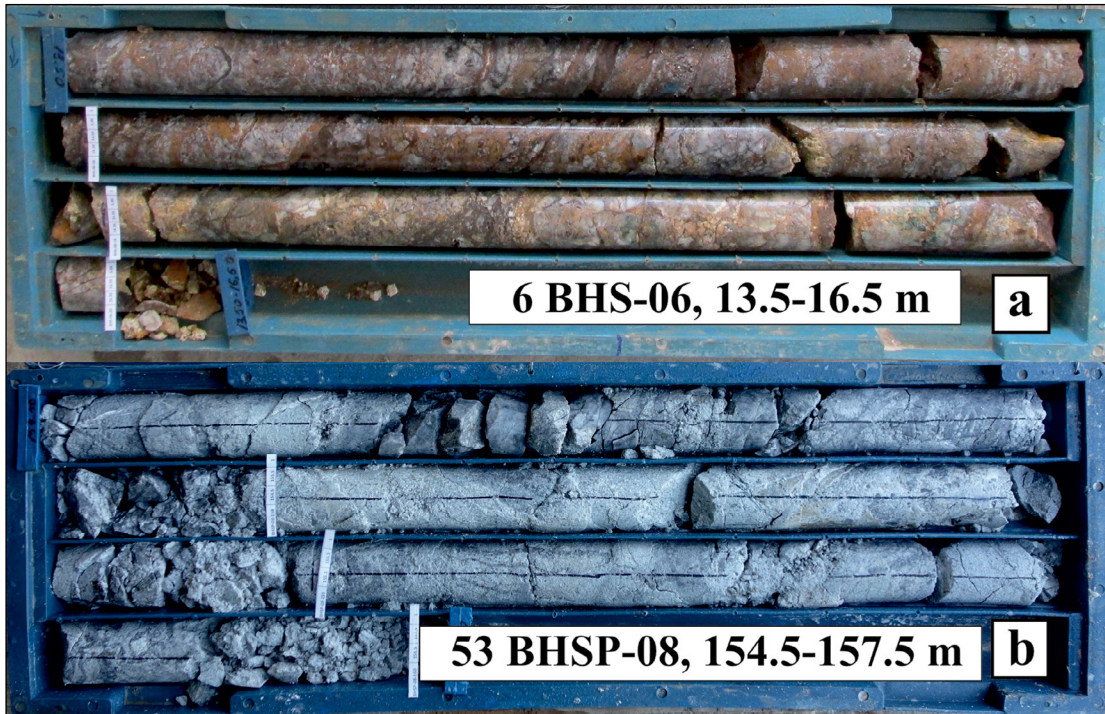
Bu nedenle, daha fazla tartışma için önemli olan yatağın temel özellikleri aşağıdaki gibidir:

1. Porfiri ve yüksek sülfidasyon epitermal cevherleşmeleri mekânsal olarak ayrılmıştır.
2. Altın mineralizasyonu, andezitik kayaçların hidrotermal olarak altere olmasından daha sonra oluşan hidrotermal breşlerde meydana gelmiştir.

### 3.2. Yüksek Sülfidasyon Epitermal ve Porfiri Sistemlerde Dikey Zonlanma - Gharta Yatağı, Gürcistan

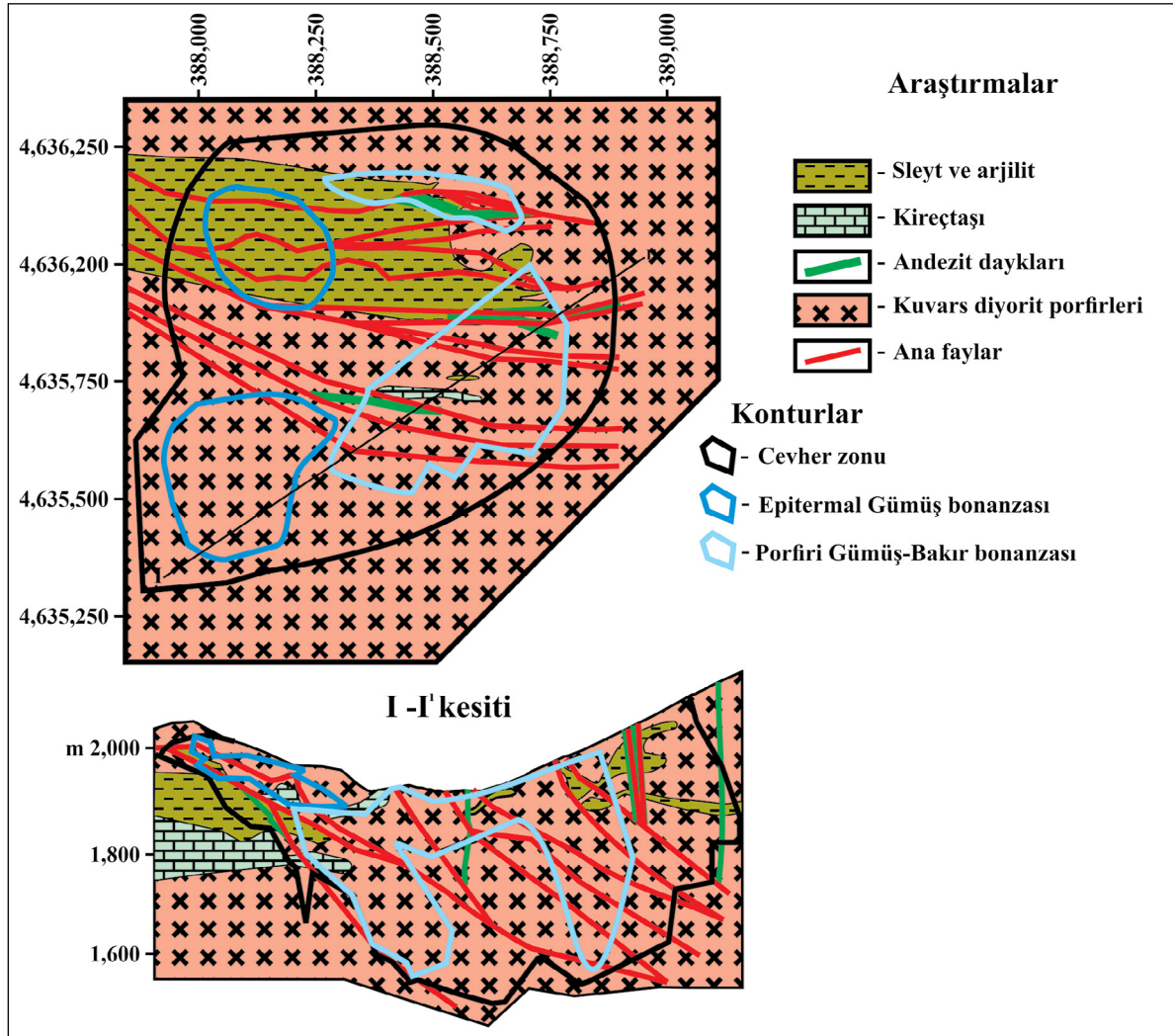
Gharta yatağı Gürcistan'ın Shida Kartli Bölgesi, Kareli ilçesinde, Gürcistan'ın başkenti Tiflis şehrine 152,5 kilometre uzaklıkta, Trilaleti Sırtı'nın kuzey yamacında, Küçük Kafkasya'da yer almaktadır. Metalojenik olarak Acara-Trialeti rift zonunun kuzeydoğu kenarına aittir (Şekil 1'de no 2). Bölgede, uluslararası ekibimiz tarafından kapsamlı bir keşif çalışması yürütülmüştür. Bugün itibariyle, yatak alanının yalnızca %15'ini kapsayan bir sondaj çalışması ardından, ortalama altın tenörü 0,93 g/t olan 9,1 milyon ton yüksek sülfidasyon tipi altın cevheri ve ortalama bakır tenörü %0,42 olan 62,8 milyon ton porfiri tipi bakır cevheri tespit edilmiştir. Şekil 5'te yatağın jeolojik harita modeli yer almaktadır.

Yatağın jeolojik yapısı, Paleojen-Alt Neojen yaşlı şist, argilit ve aleurolit birimleri ile Üst Kretase yaşlı kireçtaşları ve geç Neojen yaşlı kuvars diyorit bileşimindeki kayaların geniş alanda yüzlek vermesiyle temsil edilir. Ana kayaç parçaları çoğunlukla intrüzif kütle içerisinde kalıntı olarak korunmakta ve sadece



Şekil 4- Sonajil yatağındaki tipik cevherleşmeler, a) altın cevherleşmesi, yapboz dokulu hidrotermal breşlerde ince serbest altının bulunması ile temsil edilmektedir; hidrotermal olarak altere olmuş kuvars-serisitli kayaç parçaları kuvars ile çimentolanmıştır. Ortalama Altın tenörü 1,41 g/t'dur. b) Hidrotermal olarak altere olmuş diyoritlerdeki porfiri altın-bakır cevherleşmesi ortalama altın tenör aralığı 0,74g/t, bakır tenör aralığı % 0,56'dır.





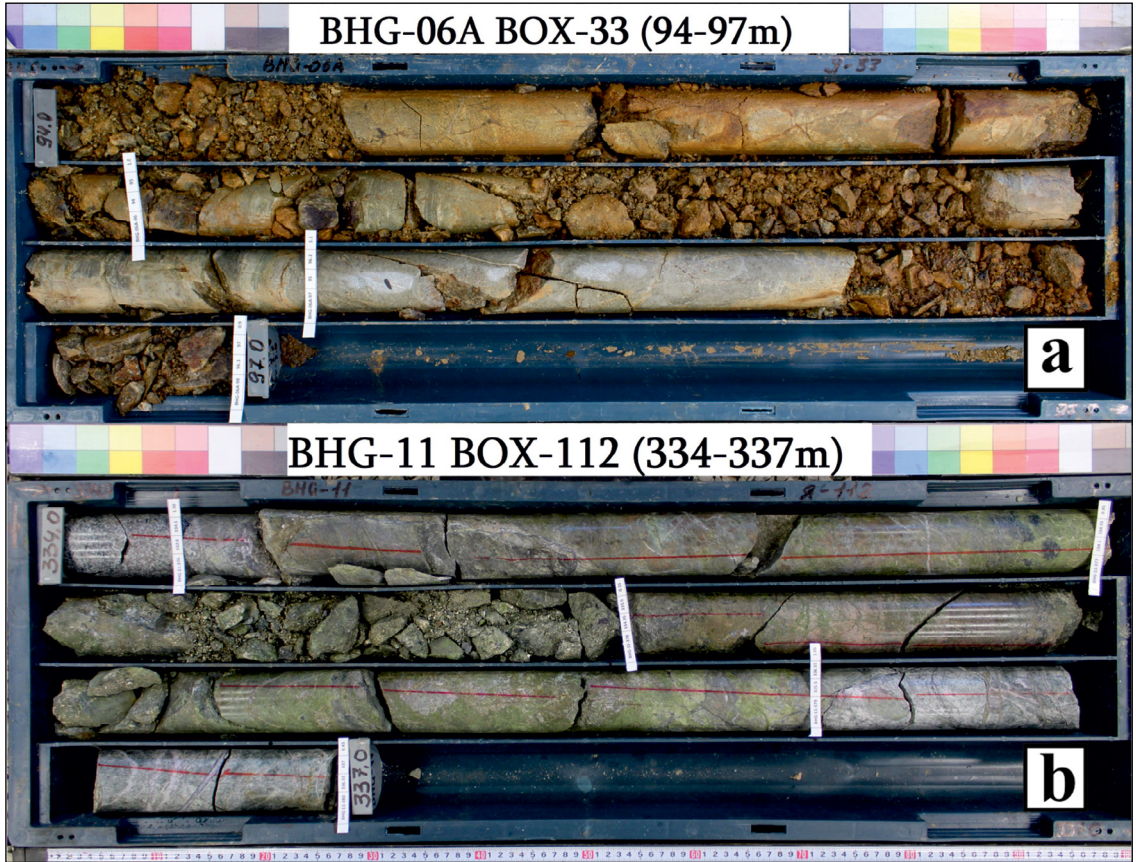
Şekil 5- Gharta yatağının jeolojik harita modeli.

kuzeybatı kesiminde sözü edilen şist serisi ile dokanak oluşturmaktadır. Çok sayıda, çoğunlukla yataya yakın doğrultulu faylar, dikey-yarı dikey eğimlidir. Cevher zonu da dahil olmak üzere tüm yapı 35-45° açı ile doğuya doğru eğimlidir.

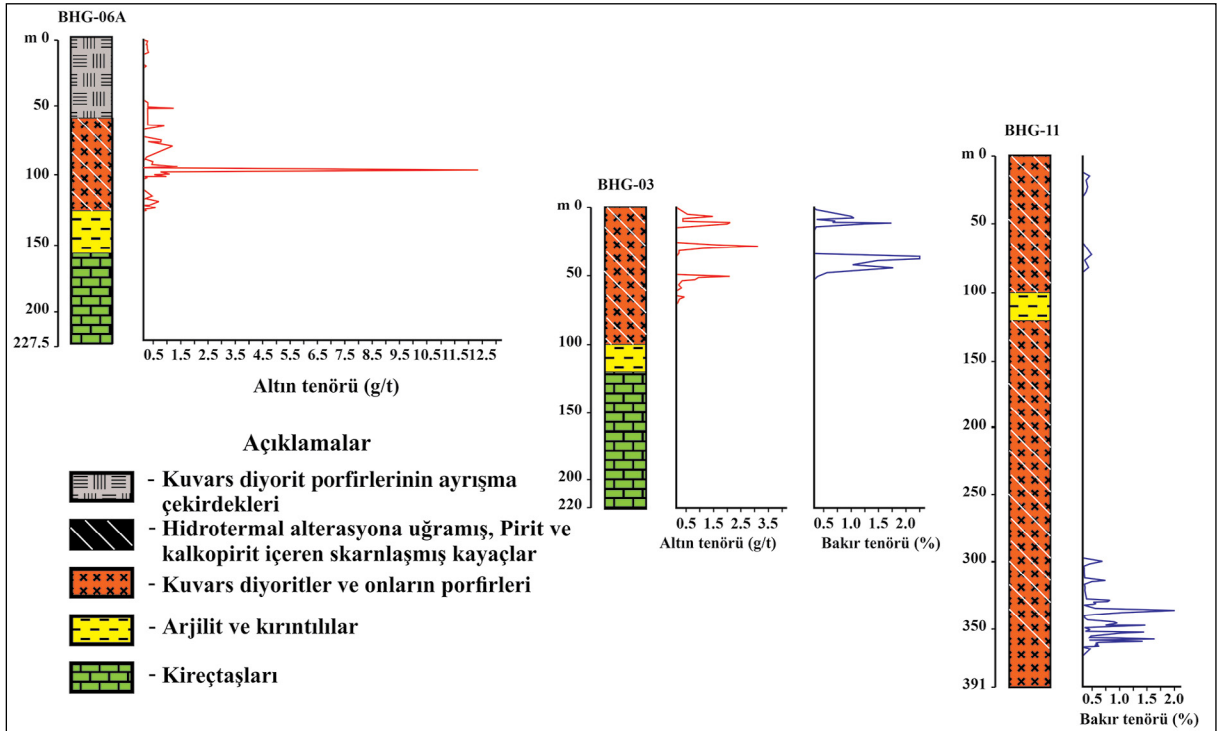
Cevher geometrisi düzensiz bir elipsoid şekle sahiptir ve yalnızca intrüziif kayalarda görülen hidrotermal olarak altere olmuş kayalar ile temsil edilmektedir. İki farklı metasomatizma türü tespit edilmiştir. Cevherleşme alanının batı kanadındaki üst seviyelerde gelişen epitermal altın bonanza zonu içinde, kuvars diyorit kalıntıları ve hidrotermal alterasyonunun erken ürünleri olan kuvars-serisitli kayalarının gri kuvars ile çimentolandığı hidrotermal breş ve boşluklu silika oluşmuştur (Şekil 6a). Derin seviyelerde porfiri bakır cevherleri, yoğun epidot

gelişimine sahip yüksek sıcaklıktaki kuvars-serisit-granatlı kayalar tarafından temsil edilmektedir. Çoğu zaman granat (difraktometrik olarak andradit) gelişimi o kadar yoğundur ki kuvars diyoritler monomineral bir granata dönüşebilir (Şekil 6b).

Yatağın karakteristik özelliği belirgin bir dikey zonlanmadır (Şekil 7). Üst seviyelerde epitermal yüksek sülfidasyon altın cevherleşmesi oluşmuştur. Yüzeyin 100 m altındaki cevherler kalkopiritce zenginleşir ve bu da değerli maden yataklarını oluşturmaktadır (Şekil 7'deki BHG-03 sondaj kuyusu). Derin seviyelerde altın içermeyen porfiri bakır cevherleşmesi tespit edilmiştir. Altın ve bakır cevherleri arasında her zaman cevher içermeyen bir boşluk bulunduğunu dikkate almak daha sonraki tartışmalar için son derece önemlidir.



Şekil 6- Tipik epitermal yüksek sülfidasyon altın ve porfiri bakır cevherleşmeleri, a) breşik ve parçalanmış boşluklu silika; ortalama altın tenörü 3.70 g/t, b) epidot (yeşil) yuvaları olan kuvars-serisit-granatlı (andradit) kaya; ortalama bakır tenörü - %1.38.



Şekil 7- Gharta yatağının dikey zonlanması.

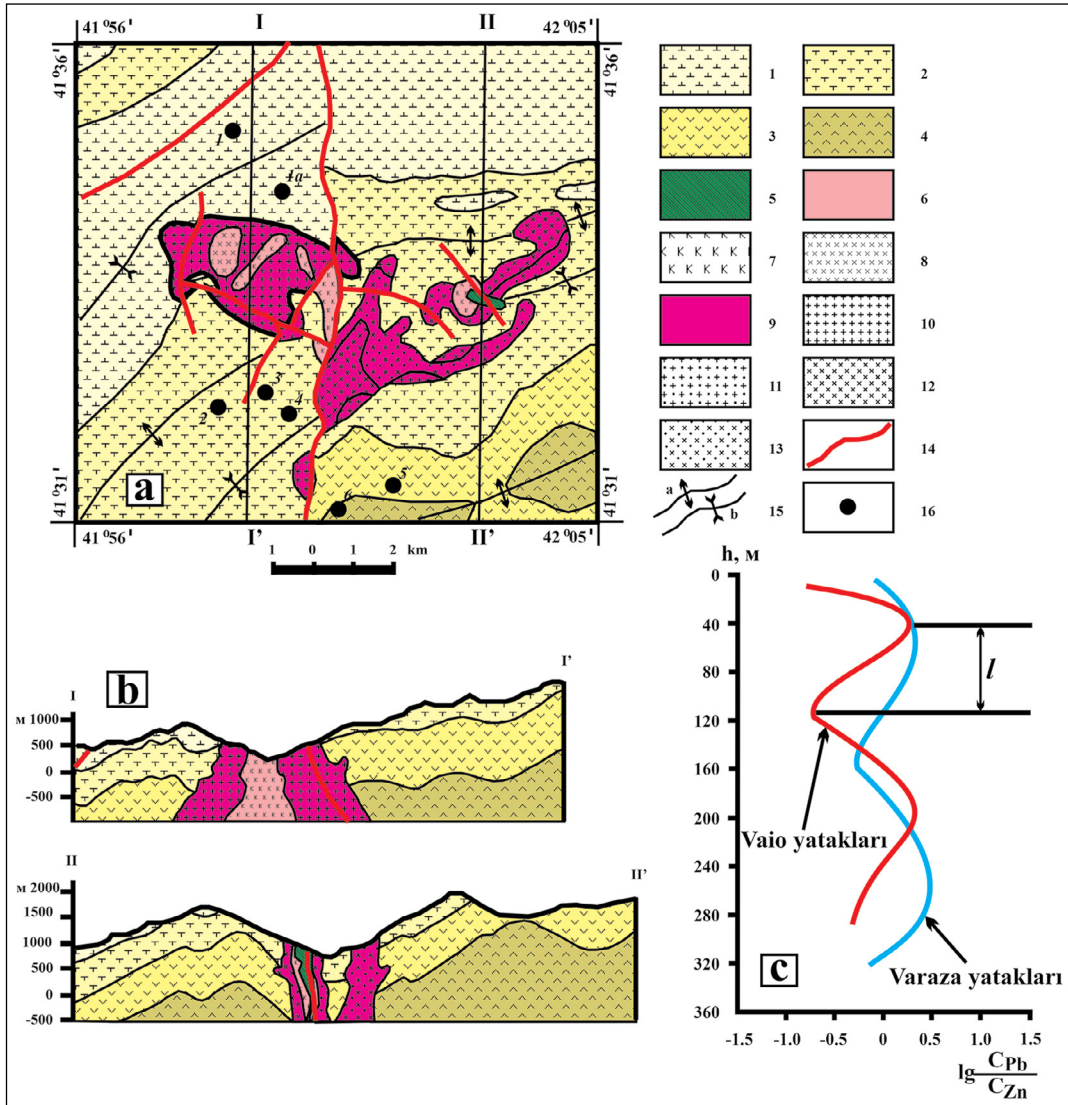


### 3.3. Ortaç Sülfidasyon ve Porfiri Bakır Sistemleri - Merisi Maden Bölgesi, Gürcistan

Merisi maden bölgesi (Şekil 1'de 1 numara) Gürcistan Acara Özerk Cumhuriyeti'nin başkenti Batum'a 60 km mesafede Türkiye sınırının hemen üzerinde Acara Dağı'nda yer almaktadır. Bu maden bölgesinde geçtiğimiz yüzyılda 30'lu ve 60'lı yıllarda arama çalışmaları yürütülmüş olmasına rağmen burada Birinci Dünya Savaşı sırasında bile bakır

madenciliği yapılmıştır. Günümüzde sadece damar tipi ortaç sülfidasyon altın içeren küçük yataklar araştırılmaktaydı ancak bölgenin ana beklentileri porfiri bakır sistemi ve olası yüksek sülfidasyon altın cevherlerinin varlığı ile ilgili olduğu için bu bölge keşif için uygun bir hedeftir.

Şekil 8, maden bölgesinin jeolojik yapısı hakkında bilgi içermektedir. Maden bölgesi, metnin yazarı ve



Şekil 8- Merisi maden bölgesinin jeolojik yapısı, a) jeolojik harita; b) jeolojik haritadan kesitler: 1- Üst Eosen - Oligosen: trakibazalt lavlar; 2- Üst Eosen: kalk-alkali bazaltlar ve tüfler; 3- Orta Eosen: bazalt-andezit-dasit volkanikleri; 4- Orta Eosen: andezit tüfleri; 5-13- intrüziif kayalar: 5- akışkan porfiri breş fazı, 6-8: kuvars diyorit porfiri fazı: 6- yarı derinlik sokulumları, 7- kuvars diyorit porfirler, 8- kuvars diyoritler; 9-13: ana intrüziif kompleks, 10- alaskitler, 11- granit porfiri, 12 - monzonitler, 13 - diyorit porfiri; 14- temel faylar; 15- a) antiklinal ve b) senklinal eksenler; 16- orta sülfidasyon altın ve baz metal damarlar: 1- Vaio, 1a - Vaio'nun Surnali bölgesi, 2- Veliburi, 3- Verkhna, 4- Tskalbokela, 5- Varaza, 6- Obolo-Kanly-Kaia, c) damarların dikey ritmik zonlanması. l- tekrarlama aralığı, CPb ve CZn - sırasıyla kurşun ve çinko tenörleri.

zamanında onun yüksek lisans öğrencisi olarak eğitim görmüş ve şu an Profesör olan Archil G. Magalashvili ile birlikte haritalanmış ve daha sonra monografimde ayrıntılı olarak açıklanmıştır (Tvalchrelidze, 2006).

Maden bölgesinin merkez kısmı, 17 km<sup>2</sup> 'lik bir alanı kaplayan ve üç alanda yüzlek veren Merisi-Namonastrevi intrüzif kompleksinden oluşmaktadır: (i) 7,5 km<sup>2</sup> 'lik alana sahip Merisi mostrası, (ii) Namonastrevi mostrası (6,5 km<sup>2</sup>) ve (iii) Chalati mostrası (2,5 km<sup>2</sup>)dır. Detaylı fay haritalama ve petrokimyasal inceleme ile Namonastrevi ve Chalati mostralarını kesen faylarının etkisiyle yaklaşık 800 metre yükseldiğini (Tvalchrelidze, 2006) ve batı ile doğu kanatlarında farklı asidik kayaların ortaya çıkmasına neden olduğunu kanıtlamıştır. Merisi mostrasındaki ana intrüzif faza ait kayalar, Namonastrevi ve Chalati mostralarındakilere kıyasla daha asidiktir. Aynı incelemeler, ikinci kuvars diyorit porfiri fazının, söz konusu fay boyunca yer değiştirme gerçekleştikten sonra sokulum yaptığını göstermiştir. Bu faza ait kayalar her iki mostrada da aynıdır. Şahsi görüşüme göre, akışkan porfiri breş fazı, porfiri cevher oluşum sisteminin merkezini işaret edebilir ve somut bir keşif işareti olarak değerlendirilebilir.

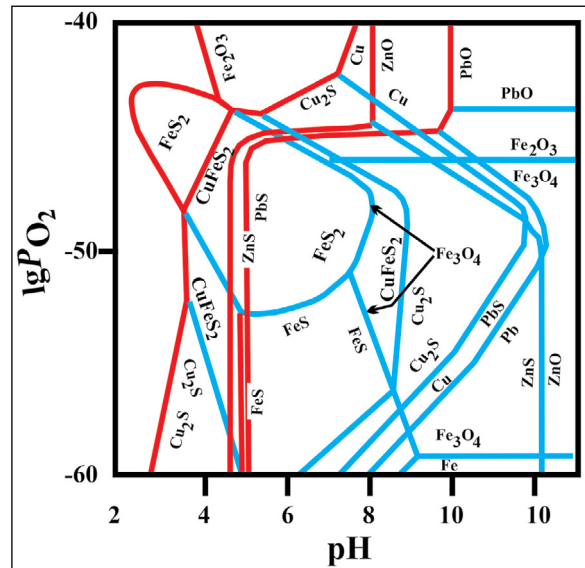
Tüm ortaç sülfidasyon altın ve baz metal epitermal yatakları ve oluşumları standart bir yapıya sahiptir. İlk olarak, intrüzif kütlelerin dokanaklarından belirli bir mesafe ile ayrılırlar. İkinci olarak, ana kaya içerisinde dikeye yakın, birkaç metreden 20 metreye kadar kalınlığa sahip ancak ortalama olarak 2-3 metre kalınlığında kuvars ± barit bileşimli damarlar halinde oluşurlar. Matrisi, çoğunlukla pirit, kalkopirit, galena, sfalerit olmak üzere, sulfoantimonitler, patrinite, klostalit gibi sülfosaltları da içeren sülfür damarları ve yuvalarını taşır. Yüzeğe yakın sülfütle oksitlenerek bornit, hematit vb. oluşmuştur. Altın hem cevherlerde ince emprenye olarak doğal bir biçimde hem de demir, bakır, kurşun ve çinko sülfürlerde karışık olarak temsil edilmektedir. Altın, hem doğal formda ince damarlar olarak cevherlerde hem de demir, bakır, kurşun ve çinko sülfürlerde bulunur. Cevher damarları, tipik orta sıcaklık hidrotermal alterasyona uğramış, fay kili benzeri haleleri olan kuvars-serisit-kloritli kayalar takip edilir. Cevherler, breşin dokusu ile tanımlanır.

Burada açıklanan porfiri ve yüksek ve orta sülfidasyon sistemlerinin özellikleri, daha ileri tartışmalar için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

#### 4. Tartışma

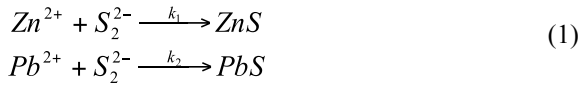
Hidrotermal sistemlerin porfiri aşamasından düşük sülfidasyon aşamasına kadar değerlendirilmesi için termodinamik koşulların araştırılması Einaudi vd. (2003) tarafından tamamlanmıştır. Bu tür çalışmalar yaklaşık olarak on altı yıl önce şahsım tarafından da gerçekleştirilmiştir (Tvalchrelidze, 1986; 1987). Örneğin Şekil 9, 250°C sıcaklık altında kristalleşen mineraller ile hidrotermal sıvı modeli arasındaki dengeyi gösteren termodinamik bir grafiği temsil etmektedir.

Bu grafiğin analizi, Einaudi vd. (2003) tarafından yapılan aynı temel sonuca götürmektedir: Sistemin gelişimi ve minerallerin kademeli olarak kristalleşmesi, akışkan nötralizasyonunun arka planında gerçekleşir. Ancak, bu tür bir analiz ne geleneksel sıvı akışlarının başlangıcını ne de cevher oluşumunu, örneğin cevher minerallerinin nispeten sınırlı bir alanda nispeten sınırlı bir süre içinde toplu olarak çökmesini açıklayamaz. Ayrıca, epitermal sistemlerin temel tipomorfik özellikleri de dikkate alınmamaktadır.



Şekil 9- Demir ve baz metal minerallerinin dengesini belirten 250°C'lik hidrotermal sıvı modeli ile ilgili grafik. Sıvı modelinin parametreleri daha önce yayınlanmıştır (Tvalchrelidze, 1987). Mavi çizgiler katı fazlar arasındaki dengeyi, kırmızı çizgiler ise katı fazlar ve model sıvı arasındaki dengeyi göstermektedir.

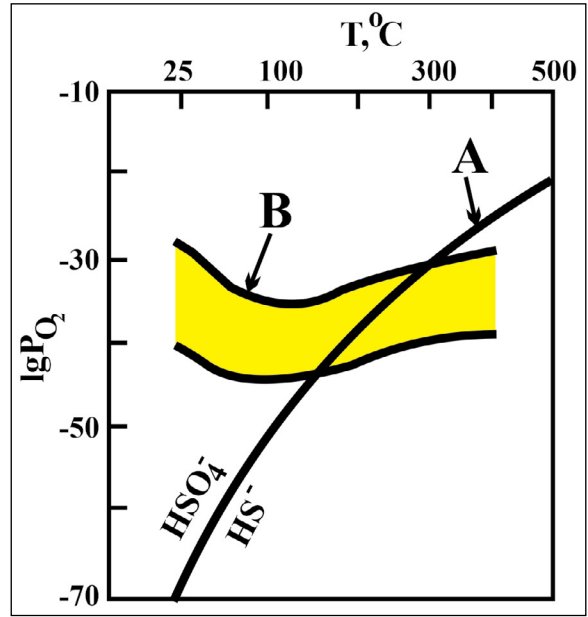
Belli bir süre önce çok sayıda damar yatağına ilişkin veriler analiz edilmiş ve hemen hemen hepsinin tekrarlı bir zonlanma ile karakterize edildiği, yani ana cevher oluşturan metallerin tenör oranlarının dikey kesitte ritmik dalgalanmalara uğradığı kanıtlanmıştır (Tvalchrelidze, 1993). Burada bu olay, Merisi maden bölgesindeki iki yatak için gösterilmektedir (Şekil 8c). Bu tür bir zonlamanın eğimi, yatağın genel dikey aralığı ile orantılıdır. Ayrıca, bu olgunun termal gradyan rehberliğinde denge dışı koşullarda cevher oluşumu tarafından belirlendiği kanıtlanmıştır. Böyle bir ortamda metal katyonları sülfür iyonu tarafından bağlanma eğilimindedir ve örneğin aşağıdaki denklemde (1) gösterildiği gibi metal sülfürlerin çökmesinin farklı reaksiyonları birbiriyle rekabet eder:



Bununla ilişkili olarak,  $k_1$  ve  $k_2$  kinetik katsayıları ilgili metallerin aşırı doygunluk derecesine bağlıdır. Bu basit varsayıma dayanarak, bu tür denge dışı reaksiyonların matematiksel ve termodinamik modeller geliştirilmiş ve tekrarlı zonlanma teorisi formüle edilmiştir (Tvalchrelidze, 1993). Bu teori bonanza zonların dağılımını ve cevher damarlarının dikey zonlanmasını göstermiş ancak epitermal yüksek sülfidasyon tip yataklar da altın cevherlerinin oluşumunu açıklayamamıştır.

Gerçekte Şekil 10'da gösterildiği gibi, altın geniş P-T koşulları aralığında hidrotermal sıvı içinde çözülmüş olarak kalmaktadır. Bu olgunun, altının metallerin ortak asidik-alkali aralığındaki ikili konumuyla ilişkili olduğu öne sürülmektedir.

İlk olarak, altın hafif asidik akışkanlarda demir ile birlikte bulunur. İkinci olarak, cevher oluşumunun son aşamalarında düşük sıcaklıktaki akışkanlardan çökler (Kolonin, 1983). Bu özellik basitçe altının arsenik ile iyi ifade edilmiş bir kimyasal yakınlığa sahip olmasıyla açıklanabilir (Marakushev ve Bezmen, 1970). Bu da yüksek sıcaklıktaki bir akışkanda hidrojen sülfür ve sülfürik asit arasındaki tek değişkenli denge çizgisinde asidik şekilde temsil edilmektedir (Şekil 10). Bununla birlikte, düşük sıcaklıktaki bir sıvıda arsenik metal gibi



Şekil 10- Baz metal sülfür ve barit kristalleşmesi sırasında kısmi oksijen basıncı. Tvalchrelidze (2006)'dan sonra, a) S6+ ve S2 arasındaki tek değişkenli denge çizgisi ve b) hidrotermal bir sıvıdaki altın kararlılığı alanı.

davranmaktadır. Buna paralel olarak, sülfid çökeltme süreçlerinde herhangi bir rol oynamaz, sıcaklığın düşmesiyle sıvıdan yavaş yavaş çökler, kesme derecesinin çok altında konsantrasyonlar oluşturur ve yüksek sülfidasyonlu hidrotermal sistemlerin normal evriminde mineral yatakları oluşturamaz.

Dolayısıyla, yüksek ve/veya ortaç sülfidasyon bir epitermal mineralizasyon oluştuğunda altın çökmesinin tek nedeni, dış nedenlerden dolayı ardışık cevher oluşum sürecinin keskin bir şekilde başarısız olmasıdır. Bu nedenlerden biri, cevher barındıran yapıların freatik çökmesi ve ardından hidrotermal sıvının kaynaması ve cevher yükünün kütlese çökmesidir.

Cevherlerde, özellikle bizim tarafımızdan ana hatları çizilen yapboz dokulu hidrotermal breşlerin (Şekil 4a) veya boşluklu (vuggy) silikanın (Şekil 6a) varlığı böyle bir çöküşün kanıtıdır. Dolayısıyla, hidrotermal breşler freatik bir karaktere sahiptir. Bu tür freatik breşlerin genellikle yüksek ve/veya ortaç sülfidasyon sistemlerinin modellerinde tanımlandığı unutulmamalıdır (Wang vd., 2019).



Bununla birlikte, porfiri veya epitermal sistemlerin karakteristik bazı özellikleri tamamen termodinamik yaklaşıma aşağıdaki sebeplerle uymamaktadır:

1. Orta ve düşük sülfidasyon mineralizasyonları, kural olarak, sokulum yapan kütlelerin dokanakları boyunca belirli bir mesafede bulunur. Dahası, bu mesafenin doğrudan plütonik kütlelerin boyutuna bağlı olduğu gösterilmiştir (Tvalchrelidze, 2006).

2. Porfiri ve yüksek sülfidasyon cevherler arasında doğrudan geçiş asla gözlenmez. Şahsım tarafımdan hiçbir yatakta böyle bir geçiş görülmemiş, bunun hakkında hiçbir şey duyulmamış veya okunmamıştır. Porfiri ve yüksek sülfidasyon cevherler arasında cevher içermeyen belirli bir boşluk olduğunu özellikle gösterdim (Şekil 7), ancak bu aralık bonanza zonlarında olduğu gibi aynı şekilde ve aynı yoğunlukta hidrotermal olarak alterasyona uğramıştır.

3. Porfiri bakır cevherleri genellikle ana intrüvizif gövde içerisindedir ve bu nedenle intrüvizif kütle tamamen kristalleştiğinde cevherleşme oluşmuştur. Eşlik eden yüksek sülfidasyon altın cevherleri aynı yaşa sahiptir ve orta ve düşük sülfidasyon cevherleşmeleri eşzamanlı veya biraz daha genç olabilir. Kristalleştiğinde bu intrüvizif kütleler bir kilometreden az olmayan belirgin bir derinliğe sahiptir ve bu nedenle yarı derinlik kökleri yoktur. Bu nedenle, bu tür birleşik sistemler için civarındaki magmatik kütlelerden beslenen yüksek ve düşük sülfidasyon sistemlerinin ortak bir modeli geçerli değildir.

Bu nedenle, soğuyan intrüvizif kütlelerin paleotermofiziksel modellerinin dikkate alınması önemli görünmektedir.

Bu tür araştırmaların öncülerinden biri, Moskova Devlet Üniversitesi'nden Jeoloji ve Mineraloji Doktoru Vladimir G. Zolotarev, geçtiğimiz yüzyılın doksanlı yıllarının başında bir trafik kazasında tüm ailesiyle birlikte trajik bir şekilde hayatını kaybetti. Onun anısına araştırmalarını sürdürdüm ve Merisi maden bölgesinin bir modelini oluşturdum.

Birkaç kelimeyle, Dr. Zolotarev'in yaklaşımı bazı basit gerçeklere dayanmaktadır (Zolotarev, 1985): Magmatik füzyon, intrüzyona uğradığında kıtsal kayalarındaki büyük ölçüde aşan bir sıcaklığa sahiptir.

Bu nedenle, termodinamiğin ikinci kuralına göre, magma ve ana kayalar arasında ısı alışverişi hemen başlar - magma soğur, kristalleşir ve ana kayalar ısıtılır. Bu tür alanların modellenmesi klasik Fourier ısı ve kütle transferi denkleminin dayanmalıdır, iletken ve iletken ısı ve kütle akışlarının bir toplamı olarak tanımlanabilir:

$$C\rho\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = -\nabla(q_L h_L + q_S h_S) + \nabla(\lambda \nabla T) + F', \quad (2)$$

Formülde:  $\rho$  = Yoğunluk  $C$  = ısı iletkenliği,  $T$  = sıcaklık,  $t$  = zaman,  $\lambda$  = ısı iletkenliği faktörü,  $h_L$  ve  $h_S$  = Füzyonun sıvı ve gaz fazlarının entalpisi,  $q_L$  ve  $q_S$  = füzyon ve sıvı faz kütleleri, temel  $1 \text{ cm}^2$ 'lik kesitten geçen,  $F'$  = faz değişimini belirleyen gizli füzyon ısısı,  $\nabla$  = Hamilton işlemcisi. 3D Descartes uzayında bu sonucunu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial Y} + \frac{\partial}{\partial Z} \right), \quad (3)$$

Zolotarev (1985) soğuyan magmatik bir cismin termofiziksel modellerinde Fourier denkleminin iletken üyesi etkisinin ihmal edilebilir olduğunu kanıtlamıştır. Bu durumda, ısı alanının zaman içindeki gelişimi klasik ısı transferi denklemi ile tanımlanabilir:

$$C\rho\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + F'(x, y, z), \quad (4)$$

Denklem (4)'ün üstel tipte olduğu ve analitik bir çözümü olmadığı kolayca kanıtlanabilir. Bu nedenle ısı alanlarının modellenmesi Zolotarev (1985) tarafından detaylandırılan bir yaklaşıma göre tamamlanmalıdır. Genel jeolojik alan, Descartes uzayında homojen bileşime ve kesin koordinatlara sahip gerekli sayıda temel bloğa bölünebilir. Daha sonra, ısı transferi denklemi her bir temel blok için ayrı ayrı çözülmelidir:

$$C\rho\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial t^2}\right) + F', \quad (5)$$

Her zaman aralığı ( $\Delta Q$ ) için  $i, j, k$  koordinatlarına sahip olan her bir bloğun ısı miktarı hesaplanabilecek ve blok sıcaklığa sahip olabilecektir:

$$T'_{i,j,k} = T_{i,j,k} + \Delta T; \Delta T = \frac{\Delta Q}{C_V}, \quad (6)$$

Formülde:  $T_{i,j,k} = t$  zaman anındaki sıcaklığı,  $T'_{i,j,k} = t + \Delta t$  zaman anındaki sıcaklığı,  $t + \Delta t$ ,  $CV =$  verilen bloğun özgül ısı iletkenliğidir. Bu yöntem koordinat eksenleri boyunca ardışık sıcaklık hesaplamasına dayandığı sürece, kararlılık koşuluna uyulmalıdır: zaman adımını eksenler boyunca bir adım takip etmelidir:

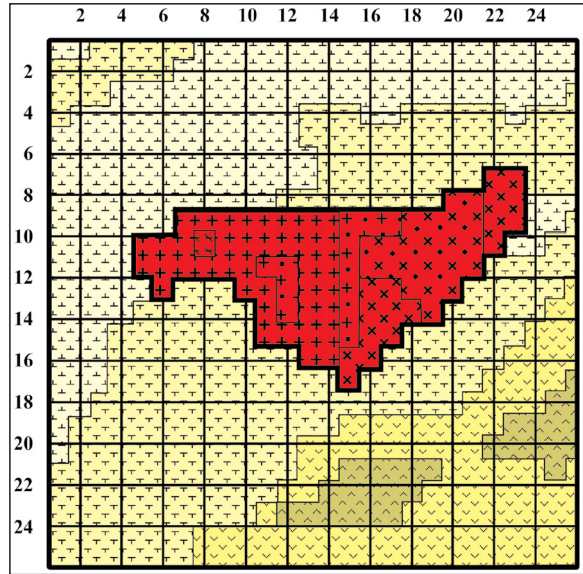
$$\partial t \leq \left(\frac{1}{2}k\right)\left(\frac{\lambda_{\max}}{C.I}\right)l_0; k = 1,2, \quad (7)$$

Formülde:  $l_0 =$  bloklar arasındaki mesafe. 2 boyutlu modellerde bu koşul, bloklar arasındaki ısı transferinin hesaplanmasıyla karşılanabilir:

$$C\rho\left(\frac{\partial T}{\partial t} + V\Delta T\right) = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + F', \quad (8)$$

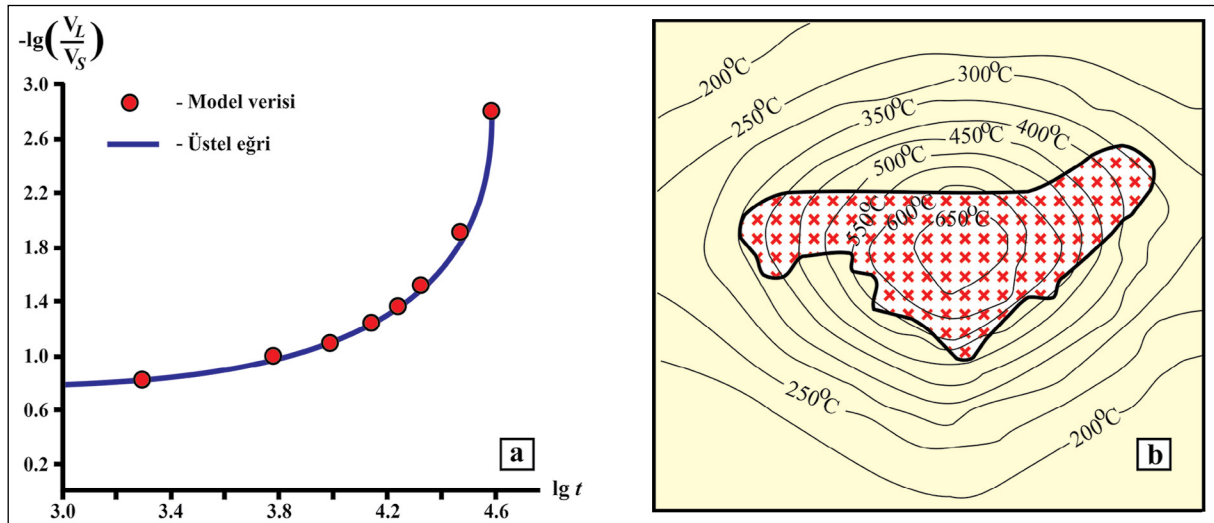
Formülde:  $\vec{V} =$  ısı transferinin hız vektörü.

Merisi maden bölgesi için tarafıma bu şekilde bir model oluşturulmuştur. Hesaplamalar için gerekli termofiziksel parametreler daha önce yayınlanmıştır (Tvalchrelidze, 2006). Şekil 11, fay tektoniği olayları ve ikinci fazın intrüzyonu gerçekleşmeden önce 2,5 kilometre derinlikteki jeolojik ortamın bir blok modelini temsil etmektedir. Şekil 12, intrüzyondan 122.000 yıl sonra kristalleşme dinamiklerini ve paleosıcaklık alanlarını göstermektedir. Tabii ki, paleosıcaklık alanları, intrüzyondan 6, 14, 22, 30, 46, 80, 122, 160, 180 ve 250 bin yıl sonrası için analiz



Şekil 11- Ana fazın intrüzyonundan hemen sonra 2,5 km derinlikte Merisi jeolojik ortamının blok modeli. Koordinat eksenleri boyunca blok numaraları gösterilmiştir (Şekil 8'deki lejanta bakınız).

edilmiştir. Bununla birlikte, intrüzyondan sonraki 122.000 yıllık dönem belirleyici bir öneme sahiptir çünkü o zamana kadar masif tamamen kristalleşmiştir (bkz. Şekil 12a). Bu kristalleşmeyi, en azından intrüzyondan sonraki 122.000 - 250.000 yıllık bir süre boyunca paleotermal alanın stabilizasyonu izlemiştir. Sunulan veriler, aşağıda tartışılan birkaç temel varsayımın formüle edilmesine imkân tanımaktadır.



Şekil 12- Merisi Plütonu'nun kristalleşme ardışıklığı, a) intrüzyondan 122.000 yıl sonra paleosıcaklık alanı, b) VL ve VS = buna uygun olarak, füzyon ve kristalleşmiş fazların hacimleri; t = yıl cinsinden zaman.

## 5. Sonuçlar

Klasik termodinamik yaklaşım, sülfür mineralleri oluşum denge koşullarında mineral çökeltme reaksiyonları olarak yorumlandığında, ne geleneksel meteorik su akışlarının oluşumunu ne de analiz edilen tipte cevher oluşumunu açıklayamaz. Porfiri ve epitermal cevher oluşumu için bazı ön koşulların var olduğu ileri sürülmektedir:

1. Çevreleyen ortamın normal termodinamiğini aşan anormal enerji (ısı) kaynağı.

2. Endojen ve meteorik bileşenlerden oluşan akışkanların geleneksel akışlarını belirleyen sıcaklık (ve ısı) gradyanının varlığı (cevher damarlarının ritmik zonlanmasıyla kanıtlanmıştır).

3. Bu koşulların sülfür cevher oluşumu süresince istikrarlı olması- bu istikrar süresi kısaltıldıkça daha küçük yataklar oluşur.

Bu tür koşullar, çoğu epitermal yatak modelinde dikkate alınan civardaki magmatik kütleden ısı transferi de dahil olmak üzere farklı jeolojik süreçler tarafından yaratılabilir. Ancak, bu tür modeller porfiri ve yüksek ve/veya orta ç sülfidasyon cevherlerin bir arada bulunduğu karmaşık cevher oluşturan sistemler için geçerli değildir. Bu gibi durumlarda cevher oluşumu için gerekli ısı, soğuyan magmatik komplekslerin paleotermal alanı tarafından sağlanır. Böyle bir ortam, bu birleşik sistemlerin aşağıdaki gibi birkaç temel özelliğini belirler:

1. Büyük porfiri bakır ( $\pm$  altın) yataklarında porfiri cevherler, intrüzif kütlelerin dokanaklarının (hem iç hem de dış dokanaklarının) yakınında bulunur; sadece küçük yataklarda magmatik gövdenin orta kısmında oluşabilirler. Bu olgu, soğuyan intrüzif masiflerin paleotermal geçmişi göz önünde bulundurulduğunda oldukça anlaşılır hale gelmektedir: Şekil 12b'den de anlaşılacağı üzere, termal alanların stabilize olduğu an için, devasa masifin orta kısmındaki sıcaklık cevher birikimi için çok yüksektir.

2. Aynı sebep, porfiri cevherlerinin yüksek sülfidasyon mineralizasyonuna doğrudan iç içe geçmemesini belirler; bunların arasında, epitermal cevher oluşumu için uygun bir seviyeye kadar sıcaklık

düşüşüne karşılık gelen belirli bir cevhersiz cevher aralığının bulunduğu gösterilmiştir.

3. Soğuyan magmatik kütle taşra kayaçlarını ısıtmaktadır; zamanla paleosıcaklık gradyanı daha düzgün hale gelirken ısınan alan daha genişlemektedir. Bu nedenle ilk ara sülfidasyon yatağı ile intrüzif cismin teması arasında belirli bir boşluk bulunmaktadır. Daha önce tarafımdan gerçekleştirilen çok sayıda plütonojenik cevher bölgesinin istatistiksel analizi (Tvalchrelidze, 2006), bu mesafenin magmatik gövdenin orantılı boyutları olduğunu ve korelasyon faktörünün çok güçlü olduğunu göstermiştir.

Dolayısıyla, böyle bir sülfür cevheri oluşum süreci yüksek sülfidasyon altın yataklarının oluşumunu açıklayamaz. Açıklandığı üzere, serbest altının kütleli olarak çökmesi, hidrotermal olarak değişime uğramış kayaçların oluşumundan sonra cevher kanalında freatik çökme gerektirir ve bu olay, genellikle yapboz dokulu hidrotermal breşlerin veya ana kayaçların ve hidrotermal olarak değişime uğramış kayaçların altın içeren bir kuvars matrisi ile çimentolandığı breşleşmiş boşluklu (vuggy) silika oluşumuyla sonuçlanır.

Tanımlanan model, bu makalede açıklanan yatakların jeolojik özellikleri ile kanıtlanmıştır. Bu model, birkaç porfiri bakır ve yüksek sülfidasyon epitermal altın yatağının keşfedilmesine yol açan kapsamlı bir arama stratejisi ve metodolojisinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Bunlardan dördü bugün yoğun bir şekilde işletilmektedir ve diğer iki yataktaki madenler yapım aşamasındadır. Birkaç yatak şu anda ekibimiz tarafından başarıyla araştırılmaktadır.

### Katkı Belirtme

On yıllardır birlikte başarılı bir şekilde çalıştığım ve araştırma yaptığım Dr. Zurab Kutelia, Dr. Revaz Kvatashidze ve Dr. Irakli Narozauli (Gürcistan); Dr. Dmitry Pertel ve Dr. Paul Hanzl (Avustralya); Dr. Andrei Kharlashin (Rusya) ve diğerlerinden oluşan uluslararası jeolog ekibine teşekkür etmekten memnuniyet duymaktayım.

Tüm profesyonel yaşamım boyunca dostluk ve iş birliği içinde olduğum merhum meslektaşlarım Dr. Veniamin Gogishvili, Dr. Tina Gogishvili (Gürcistan); Dr. Bogdan Bogdanov (Bulgaristan); Dr. Mirko



Vaněček, Dr. Zdenek Pouba (Çek Cumhuriyeti); Dr. Valentin Naumenko, Dr. Yuri Koptyukh (Ukrayna); Dr. Emin Suleymanov, Dr. Vagif Ramazanov (Azerbaycan Cumhuriyeti); Dr. Vladimir G. Zolotarev'i (Rusya) saygı ile yad etmekteyim.

### Değınilen Belgeler

- Adamia, S. A., Chkhotua, T., Kekelia, M., Lordkipanidze, M., Zakariadze, G. 1981. Tectonics of the Caucasus and adjoining regions: Implications for the evolution of the Tethys ocean. *Journal of Structural Geology*, 3, 437-447.
- Adamia, S., Zakariadze, G., Chkhotua, T., Sadradze, N., Tsereteli, N., Chabukiani, A., Gventsadze, A. 2011. Geology of the Caucasus: A review. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 20 (5), 489-544.
- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z., Zhou, L. 2015. Temporal-spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: Constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology. *Ore Geology Reviews*, 70 (4), 385-406.
- Aluç, A., Kuşcu I, Peytcheva I, Cihan, M., von Quadt, A. 2020. The late Miocene Öksüt high sulfidation epithermal Au-Cu deposit, Central Anatolia, Türkiye: Geology, geochronology, and geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 126, 103795.
- Arribas, A. Jr. 1995. Characteristics of high sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. Thompson, J.F.H. (ed.) *Magma, Fluids, and Ore Deposits*. Mineralogical Association of Canada Short Course, 23, 419-454.
- Berberian, M., King, G.C.P. 1981. Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Science*, 18, 210-265.
- Berger, B. R., Ayuso, R.A., Wynn, J.C., Seal, R.R. 2008. Preliminary model of porphyry copper deposits. Open-File Report 2008-1321. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Reston, 62.
- Bogdanov, K., Musaev, S., Ahmedov, A., Salmanli, R. 2013. High-sulphidation (HS) epithermal gold mineralisation in the Chovdar deposit, Lesser Caucasus, Azerbaijan. *Proceedings of Bulgarian Geological Society National Conference with international participation "GEOSCIENCES 2013"*. Sofia, 15-16.
- Boomeri, M., Nakashima, K., Lentz, D.R. 2010. The Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran: A mineralogical analysis of the igneous rocks and alteration zones including halogen element systematics related to Cu mineralization processes. *Ore Geology Reviews*, 38 (4), 367-381.
- Cas, R., Giordano, G., Balsamo, F., Esposito, A., Lo Mastro, S. 2011. Hydrothermal Breccia Textures and Processes: Lisca Bianca Islet, Panarea Volcano, Aeolian Islands, Italy. *Economic Geology*, 106, 437-450.
- Diarra, K., Sangu, E., Çiftçi, E. 2019. Ore mineralogy of high sulfidation Çorak-Taç epimesothermal gold deposit (Yusufeli-Artvin-Türkiye). Glagolev, S. (ed.) *Proceedings of 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019)*, Springer Nature Switzerland AG. Cham, 53-58.
- Einaudi, M. T., Hedenquist, J., Inan, E. E. 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. *Volcanic, Geothermal and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth*. Special Publication 10. Society of Economic Geologists. Ottawa, 285-311.
- Engin, T. 2003. Mineral Deposits of Türkiye. Tvalchrelidze, A.G., Morizot, G. (eds). *Mineral Resource Base of the Southern Caucasus and Systems for its Management in XXI Century*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht-Boston-London, 81-104.
- Ersoy, A. 2022. The current status of gold mining in Türkiye: An overview. *NOHU Journal of Engineering Sciences*, 11(4), 1103-1114.
- Ghaderi, M., Narges, Y., Mina, B. K. 2018. Porphyry copper deposits of Iran. *Tarbiat Modarres University Press*. Tehran, 668.
- Goldfarb, R. J., Groves, D.I., Gardoll, S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18 (1-2), 1-75.
- Gülyüz, N., Gülyüz, E., Shipton, Z. K., Kuşcu, İ., Lord, L. A. 2020. Geological and mineralization characteristics of the Kestanelik epithermal Au-Ag deposit in the Tethyan Metallogenic Belt, NW Türkiye. *Geoscience Journal*, 24, 407-424.
- Hajalilou, B., Aghazadeh, M. 2016. Geological, alteration and mineralization characteristics of Ali Javad Porphyry Cu-Au deposit, Arasbaran Zone, NW Iran. *Open Journal of Geology*, 6, 859-874.
- Hastorun, S. 2022. The mineral industry of Türkiye. 2019 Minerals Yearbook. Türkiye. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Manto Park, 47.1-47.19.
- Hedenquist, J. W. 2000. Exploration for epithermal gold deposits. *SEG Reviews*, 13, 245-277.
- Heidari, S. M., Daliran, F., Paquette, J.-L., Gasquet, D. 2015. Geology, timing, and genesis of the high

- sulfidation Au (-Cu) deposit of Touzlar, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 65, 460–486.
- Hosseini, S. A., Asghari, O., Emery, X. 2017. Direct block-support simulation of grades in multi-element deposits: application to recoverable mineral resource estimation at Sungun porphyry copper-molybdenum deposit. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 117, 577-585.
- Imamverdiyev, N. A., Baba-zadeh, V. M., Mursalov, S. S., Valiyev, A. A., Mansurov, M. I., Abdullayeva, S.F. 2021. New perspective Reza gold deposit (Gedabek ore district, Lesser Caucasus, Azerbaijan). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 30 (1), 53-64.
- John, D.A. (Ed.). 2010. Porphyry copper deposit model. Scientific Investigations Report 2010-5070-B. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, 170.
- John, D.A., Vikre, P.G., du Bray, E.A., Blakely, R.J., Fey, D.L., Rockwell, B.W., Mauk, J.L., Anderson, E.D., Graybeal, F.T. 2018. Descriptive models for epithermal gold-silver deposits. Mineral Deposit Models for Resource Assessment. Scientific Investigations Report 2010–5070–Q. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Reston, 264.
- Kaviani, A., Hatzfeld, D., Paul, A., Tatar, M., Priestley, K. 2009. Shear-wave splitting, lithospheric anisotropy, and mantle deformation beneath the Arabia-Eurasia collision zone in Iran. *Earth and Planetary Science Letters*, 286 (3-4), 371–378.
- Kolonin, G.R. 1983. Acidity & alkalinity evolution character in ore-forming fluid based on experimental data. Dobretsov, N.L. (ed.) *Dynamic and Physical-Chemical Models of Magmatic Systems*. Nauka Publisher. Novosibirsk, 57-70 (in Russian).
- Kuşçu I., Tosdal, Richard M., Gençalioglu-Kuşçu, G. 2019. Chapter 8. Porphyry-Cu Deposits of Türkiye. Pirajno, F., Ünlü, T., Dönmez, C., Şahin, B.M. (eds): *Mineral Resources of Türkiye*. Springer Nature Switzerland AG. Cham, 337-425.
- Marakushev, A. A., Bezmen, N. I. 1970. Thermodynamics of sulfides and oxides related to ore formation problems. Nauka Publisher. Moscow, 215 (in Russian).
- Marutani, M. 2003. Study on mining sector development master plan in the Republic of Armenia. Final report. Japan International Cooperation Agency (JICA), Steering Committee of Study on Mining Sector Development Master Plan of Government of the Republic of Armenia. Yerevan-Tokyo, 46.
- Mederer, J., Moritz, R., Ulianov, A., Chiaradia, M. 2013. Middle Jurassic to Cenozoic evolution of arc magmatism during Neotethys subduction and arc-continent collision in the Kapan Zone, southern Armenia. *Lithos*, 177, 61-78.
- Mehrabi, B., Chaghaneh, N., Fazel, E. T. 2008. Intermediate sulfidation epithermal mineralization of No. 4 anomaly of Golojeh deposit (N. Zanjan) based on mineralogy, alteration and ore fluid geochemistry features. *Journal of Economic Geology*, 6 (1), 1-22.
- Mehrabi, B., Sianib, M. G., Azizic, H. 2014. The genesis of the epithermal gold mineralization at North Glojeh Veins, NW Iran. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, 15 (1), 479-497.
- Moritz, R., Rezeau, H., Ovtcharova, M., Tayan, R., Melkonyan, R., Hovakimyan, S., Ramazanov, V., Selby, D., Ulianov, A., Chiaradia, M., Putlitz, B. 2016. Long-lived, stationary magmatism and pulsed porphyry systems during Tethyan subduction to post-collision evolution in the southernmost Lesser Caucasus, Armenia and Nakhitchevan. *Gondwana Research*, 37, 465-503.
- Moritz, R., Rezeau, H., Mederer, J., Gialli, S., Hemon, P., Lavoie, J., Calder, M., Hovakimyan, S., Melkonyan, R., Tayan, R., Popkhadze, N., GuGushvili, V., Ramazanov, V. 2017. Gold deposits of the Lesser Caucasus: products of successive Mesozoic and Cenozoic geodynamic settings. *Mineral Resources to Discover – Proceedings of the 14th SGA Biennial Meeting*, 1. Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Geneva, 67-70.
- Oyman, T., Minareci, F., Pişkin, Ö. 2003. Efemçukuru B-rich epithermal gold deposit (İzmir, Türkiye). *Ore Geology Reviews*, 23, (1-2), 35-53.
- Payot, B. D., Maglambayan, V. B., Dimalanta, C. B., Yumul Jr., G. P., Tamayo Jr., R. A., Matsuda, T., Suzuki, S., Bellon, H. 2005. Geology and hydrothermal alteration of the low sulfidation Pantingan Gold System, Mount Mariveles, Bataan (Luzon), Philippines. *Resource Geology*, 55 (3), 155-162.
- Richards, J. P. 2015. Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision. *Ore Geology Reviews*, 70, 323-345.
- Shafiei, B., Shahabpour, J. 2008. Gold distribution in porphyry copper deposits of Kerman Region, southeastern Iran. *Journal of Sciences*, 19 (3), 247-260.
- Sholeh, A., Rastad, E., Huston, D., Gemell, J. B., Taylor, R. D. 2016. The Chahnaly low-sulfidation epithermal gold deposit, Western Makran volcanic arc, southeast Iran. *Economic Geology*, 111, 619–639.

- Sillitoe, R. H. 2000. Styles of high-sulphidation gold, silver and copper mineralisation in porphyry and epithermal environments. *Proceedings of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 305, 19-34.
- Sinclair, W. D. 2007. Porphyry Deposits. Goodfellow, W. D. (ed.) *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, 223-243.
- Taylor, B. E. 2007. Epithermal gold deposits. Goodfellow, W. D. (ed.) *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, 113-139.
- Tvalchrelidze, A. G. 1980. Copper metallogeny of the Caucasus. Jankovic, S. (ed.) *European Copper Deposits*. Belgrade, 191-196.
- Tvalchrelidze, A. G. 1984. Main features of metallogeny of the Caucasus, Janelidze, T.V., Tvalchrelidze, A.G. (eds): *Proceedings of the Sixth Quadrennial IAGOD Symposium*. Vol. 1. E. Schweizerbat'sche Verlagbuchhandlung. Stuttgart, 1-5.
- Tvalchrelidze, A. G. 1986. Physico-chemical conditions of base metal sulphide ore formation. Friedrich, G. H., Genkin, A. D., Naldrett, A. J. Ridge, J. D., Sillitoe, R. H. Vokes, F. M. (eds.) *Geology and Metallogeny of Copper Deposits*. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokyo, 358-369.
- Tvalchrelidze, A. G. 1987. Geochemical conditions of base metal sulfide deposit formation. Nedra Press. Moscow, 188 (in Russian).
- Tvalchrelidze, A. G. 1993. Quantitative models of vein type ore deposits and theory of rhythmical zoning. *Geological Association of Canada Special Papers*, 40, 751-760.
- Tvalchrelidze, A. G. 2003. Mineral resource base of Georgia in XXI century. Tvalchrelidze, A.G., Morizot, G. (eds.) *Mineral Resource Base of the Southern Caucasus and Systems for its Management in the XXI Century*. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht-Boston-London, 19-70.
- Tvalchrelidze, A. G. 2006. Mineral resources and mineral resource base of Georgia. Rudy I Metall Publishing House. Moscow, 320 (in Russian).
- Veliyev, A., Bayramov, A., Ibrahimov, J., Mammadov, S., Alizhadeh, G. 2018. Geological setting and ore perspective of the new discovered Gadir low sulfidation epithermal deposit, Gedabek NW flank, Lesser Caucasus, Azerbaijan. *Universal Journal of Geoscience*, 6 (3), 78-101.
- Wang, L., Qin, K., Song, G., Li, G. 2019. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews* 107, 434-456.
- Yiğit, O. 2006. Gold in Türkiye – a missing link in Tethyan metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 28 (2), 147-179.
- Yiğit, O. 2009. Mineral deposits of Türkiye in relation to Tethyan metallogeny: Implications for future mineral exploration. *Economic Geology*, 104 (1), 19-51.
- Zolotarev, V. G. 1985. Spatial-temporal dynamics of processes related to granite consolidations and their role in ore formation. *Sciences de Terre. Série Information géologique*, 23, 27-48.



