

Keçiborlu Ocaklarında (G.B. Türkiye) Hidrotermal Kükürt Yatakları Oluşumunu Kontrol Eden Faktörler

Abdullah Mete ÖZGÜNER^{1,*}

¹*Maden Teknik ve Arama Genel Müdürlüğü, ANKARA*

Başvuru: 14.08.2013 Kabul: 14.08.2013

ÖZET

Ornatma tipi Keçiborlu yeraltı kükürt yatakları, Isparta ve Afyon alkalin Pliyosen volkanitleri arasında (GB Türkiye) ve fay kontrollü ve metasomatik alterasyona uğramış bir ofiyolitik medya içinde yer alır.

Kükürt cevherleşiren yeraltı volkanik gaz ve sıvılar, yukarı doğru oblik atımlı graben fay zonu boyunca daha gözenekli fay kesişme lokasyonlarındaki oksitleyici meteorik suya doygun ortama taşınmış ve buralarda ornatmayla masif kükürt yatakları geliştirmiştir.

Ana kayacın kimyasal alterasyonu ve kükürt yatağı oluşumu, ezik gözenekli kesişen fay merkezlerinden dış doğru volkanik gaz ve sülfürik asitli suların kükürde oksitlenmesi ve sızması ile karakterize edilir. Sonuç olarak, kükürt yatağı etrafında eş merkezli, küresel biçimli, piritli, opalli ve killi zonlar gelişmiştir. Yeraltı suyuna doygun kısımlarda ve kesintisiz bir cevherleşme fazında her bir alterasyon zonu, birbirini kesmeyecek şekilde zamanla içten dış zonalara doğru ilerleyip genişleyerek merkezde kükürt cevheri gelişmiştir.

Anahtar kelimeler: *Keçiborlu kükürt ocakları, oblik atımlı fay zonu, metasomatik alterasyon, yeraltı suyuna doygun ortam, alkalin yeraltı volkanizması, ofiyolitik ana kayaç.*

ABSTRACT

Replacement-type subsurface sulphur ores of Keçiborlu are situated in fault controlled and metasomatically altered fragmental ophiolite media between alkaline Pliocene volcanics of Isparta and Afyon regions (SW Turkey).

Subsurface volcanic sulphur-mineralizing fluids and gases were brought up along the sulphur-hosting oblique slip fault zone into the oxidizing meteoric water-saturated media and the sulphur-ore bodies were developed at more porous, cross-fault locations.

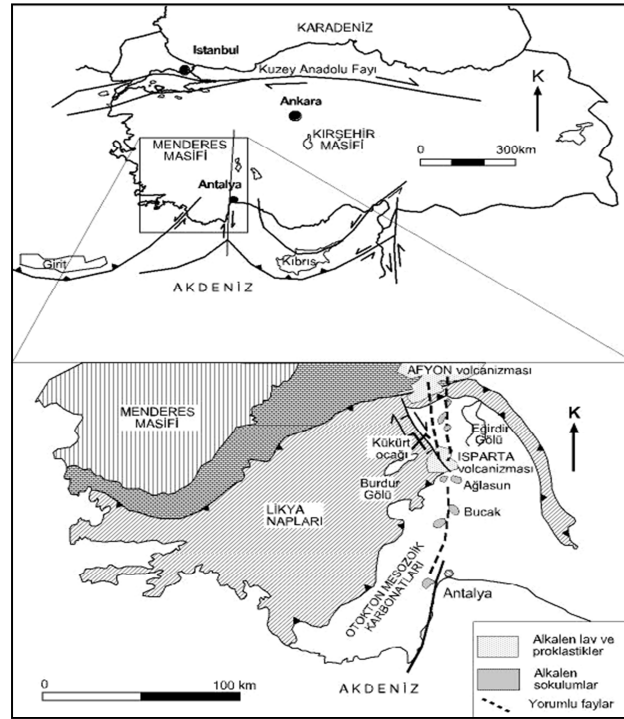
Chemically the sulfotatic alteration of the parent rock and sulphur ore formation is characterized by outward volcanic gas and sulphuric acid water leaching and oxidation to sulphur from the crushed porous centers. Consequently, concentric pyritiferous, opaline and argillaceous zones developed adjacent to the sulphur ores. The inner alteration zones progressed and widened toward the outer zones through time and the central sulphur ore developed during a single, continuous phase of mineralisation in the water saturation zone such that the alteration zones do not cross each other.

Key words: Keçiöborlu sulphur mine, oblique slip fault, metasomatic alteration zones, water saturation media, alkaline subsurface volcanism, ophiolitic host rock.

1. GİRİŞ

İyi bilinen Helenik ve Kıbrıs yay sistemleri arasındaki sınır zonu, batı ve orta Anadolu'da bulunan, sırasıyla iki allokon kristalen Menderes ve Kırşehir masiflerini

ayırarak bir transform fay sistemini oluşturmaktadır (1) ; (2). Keçiöborlu kükürt ocakları, yaklaşık bu alkaline volkanizmalı sınır zonunda yer almaktadır (Şekil.1).



Şekil 1. Keçiöborlu kükürt ocakları alanının lokasyon haritası (1)'den kısmen değiştirildi).

(Location map of the study area).

Geç Kretase-Paleojen sürecinde Likya naplarının güneye doğru birbiri üzerine bindirmeleri, bölgede kabuk kalınlaşmasına neden olmuştur (3). Derin astenosferik mantonun yükselmesine de yol açan, olasılıkla çarpışma-sonrası gerilim tektoniğine bağlı manto kısmi ergimesi aynı anda gerçekleşmiştir. Güneybatı Anadolu'da kuzey-güney kabuk gerilimi ve ilgili sedimenter havza oluşumu erken Miyosen'de başlamıştır (4) ; (2). KD ve KB yönlü grabenlerin en belirgin morfolotektonik yapıları oluşturduğu bu bölge aktif olarak gerilim tektoniğinin

etkisi altındadır. Oblik atımlı normal faylar, graben ve horst oluşumundan sorumludur. Güney Sandıklı grabeni aktif faylanması ve ilgili Pliyosen alkaline volkanizması Keçiöborlu hidrotermal kükürt yataklarının yerleşiminde rol oynamıştır (Şekil. 2).

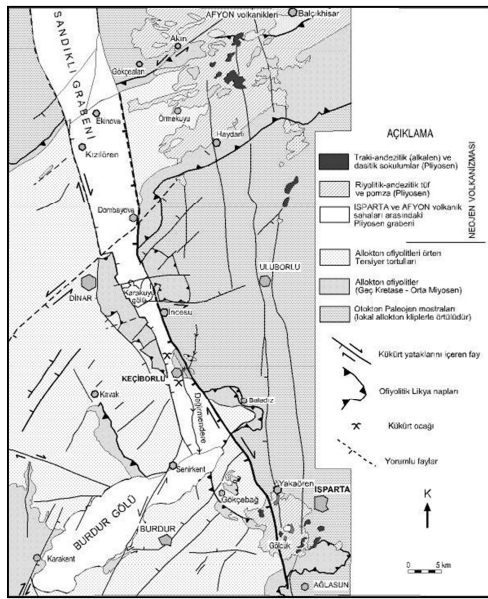
Keçiöborlu kükürt yatakları, Burdur gölünün 15km kuzeyinde ve Isparta ve Afyon Tersiyer volkanik oluşumlarının arasındaki Sandıklı grabeni güney bölümünde yer almaktadır. Kükürt yataklarının geliştiği

ana kayaç, kükürt fay zonunun kestiği Likya napları ofiyolitik karmaşığdır (Şekil. 2). Bu fay zonu, sözkonusu iki alkaleen volkanizma sahası arasındaki Sandıklı grabenin doğu kanadını oluşturur (Şekil. 2).

İşletilebilir kükürt yatakları, fay zonu doğrultusu boyunca zincirleme olarak, akarsuların kestiği lokasyonlarda, düşen batı blok tarafında yer almaktadır. Bu nedenle kükürt ocakları, üzerindeki derelerin ismini almıştır.

Keçiborlu kükürt yatakları, bu güne kadar, Türkiye'nin yegane işletilebilir kükürt yataklarını oluşturur. Etibank tarafından 1935 ve 1995 yılları arasında işletilmiştir. Toplam rezerv, % 20-90 elementer kükürt tenörlü yaklaşık 3 milyon ton kükürt cevheri olup 1995 yılına kadar toplam 1.300.000 ton elementer kükürt üretilmiştir. Ofiyolitik ana kayaç içerisinde bulunan çeşitli boyutlardaki şekilsiz masif ornatma tipi kükürt yatakları, 5 – 250m derinliklerde yer alır (5) ; (6).

Yeni yeraltı kükürt yatağının bulunması için teklif edilen sondaj lokasyonları, hem jeolojik ve hem de jeofiziksel verilere dayanılarak önerilmiştir.



Şekil 2. Keçiborlu kükürt ocakları sahası ve çevresinin şematik jeoloji haritası. Kükürt yatakları lokasyonu, kükürt oluşumuyla eş yaşlı volkanik sahalarda, kükürt fay zonu ve çapraz kesen faylar ve ofiyolitik naplar arasındaki ilişkiyi göstermektedir (7). (Schematic geological map of the sulphur mines region).

Bunlar arasında daha önce gerçekleştirilen sondaj logları ve lokasyonlarını içeren jeolojik kesitler en yararlı verileri oluşturmuştur.

Makale, arazi çalışmalarının sonuçlarını sunar. Yapısal etkileri, yerleşim esnasında ana kayacın fiziksel özelliklerini, mineralizasyon gaz ve sıvılarını taşıyan volkanik sızmaları, bu sızmaları kolaylaştıran, elementer kükürde oksitleyen ve kükürt cevheri etrafında alterasyon

zonları gelişimini sağlayan suya doymuş zon gibi kükürt yatağı oluşumunu kontrol eden faktörleri açıklar.

2. YAPISAL DURUM

Fay zonunda şiddetli bir hidrotermal alterasyon görüldüğü ve ofiyolitik kompleks ile otokton Paleojen türbiditleri yan yana geldiği için kükürt ocakları mostralalarında fay zonunun hareket yönünü görmek ve ölçmek zordur (Şekil.3). Bununla beraber, arama sondajlarından geçen kesitler, bu fayın doğu ve batı yakasındaki serpantin klipleri arasındaki düşey atımının 250m'den daha fazla olduğunu gösterir (Şekil.4a). KB-GD doğrultulu fay zonunun doğu ve batı tarafında Değirmendere'nin akış yönü kuzeyden güneye doğrudur. Fay zonunda ise Değirmendere'nin akış yönü doğudan batıya doğru değişir (Şekil.2 ve Şekil.3). Nehrin akış yönünün bu değişimi, ya fay zonunun sağ yanal hareketinden kaynaklanmakta veya bu fay zonunu kesen D-B doğrultulu diğer bir faylanmanın sonucudur. Fakat, burada D-B doğrultulu bir fay ve devamını, kükürt fay zonunun her iki yakasında da görmek mümkün değildir. Sonuç olarak Değirmendere'nin bu yön değişimi, fay zonunun sağ yanal atımından kaynaklanmaktadır (Şekil. 3).

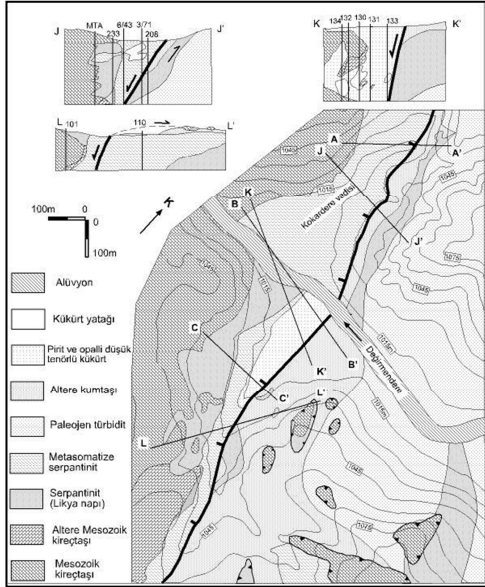
Kükürt taşıyan mineralize gaz ve sıvılar, batıya (50°-70°) eğimli normal fay zonu boyunca yükselmiş ve yeraltı suyuna-doymuş bölümlerde kükürt cevherini biriktirmişlerdir (Şekil.4). Bu nedenle çoğu kükürt yatakları, fay zonunun düşen batı blok tarafında yer aldığı gözlenmektedir. Sadece Değirmendere ve Kükürtdere ocaklarında fay zonunun doğu yakasında da küçük boyutlu yeraltı kükürt cevher birikimi görülmekte ve bu genel kurala ters düşmektedir (Şekil.4b). Doğrultu atımlı faylar, özellikle transform faylar kendi civarlarında ikincil yırtıklara sahiptir (8). Yanal atım esnasında fay zonunun doğu yakasında ikincil yırtıklar gelişmiş ve kükürt cevheri mineralizasyonuna uygun ezik, daha gözenekli ana kayaçlar oluşmuştur. Büyük fay eğimleri, ikincil fay yırtılmaları ve sağ yanal hareket, fay zonunun yanal atım özelliklerini belirtir.

Fayın batı yakasında başlangıçta açık ocak olarak işletme yapılan Kumludere ocağı kazılarında, fayın, doğu yakasında Oligo-Miyosen konglomeralarını kestiği açığa çıkmıştır. Kokardere ve Kükürtdere ocakları arasındaki Asar tepede ise, fay zonu pembe renkli Kuvaterner konglomeraları ile uyumsuz olarak örtülüdür. Bu nedenlerle, kükürt ocaklarının bulunduğu sahada oblik atımlı fay zonu hareketi ve ilgili yeraltı volkanizması ve metasomatizma yaşının Miyosen sonrası ve Kuvaterner öncesi olduğu anlaşılmaktadır.

Likya naplarının birbirini üzerleyen ofiyolitik allokon birimleri, oblik atımlı, kükürt fay zonu tarafından kesilmiş ve bu fayın yükselen doğu tarafındaki allokon ofiyolitik birimlerin çoğu aşınıp altındaki otokton birimler açığa çıkmıştır (Şekil.3). Böylece kükürt fay zonu, bölgede napların yerleşiminden sonra gelişmiştir (Şekil.2 ve Şekil.3). Fay, allokon ofiyolitik kompleks ve otokton Paleojen türbiditler arasındaki kontakta yer almakla beraber, ofiyolitik naplarla kükürlü çıkışlar arasında hiçbir genetik ilişki yoktur. Kükürt cevheri

mineralleşmesi, ofiyolitleri kesen, nap yerleşim-sonrası genç oblik atımlı, (50°-70°) eğimli fay hareketiyle Fakat, devam eden bu grabenin doğu kanadı boyunca, kükürt ocaklar sahası hariç, hiçbir şiddetli metasomatik alterasyon mostrasına rastlanmaması dikkat çekicidir. Yarı dom-şekilli dış görünümüne sahip kükürt ocakları alanının, yakın civarından daha yüksek topografyaya sahip olması dikkat çekici diğer bir yanıdır. Bu yapı, kükürt ocakları sahasında olası genç yeraltı alkaleli mağma sokulumundan mı ileri gelmektedir ? Henüz bu cevaplandırılmamış bir sorudur.

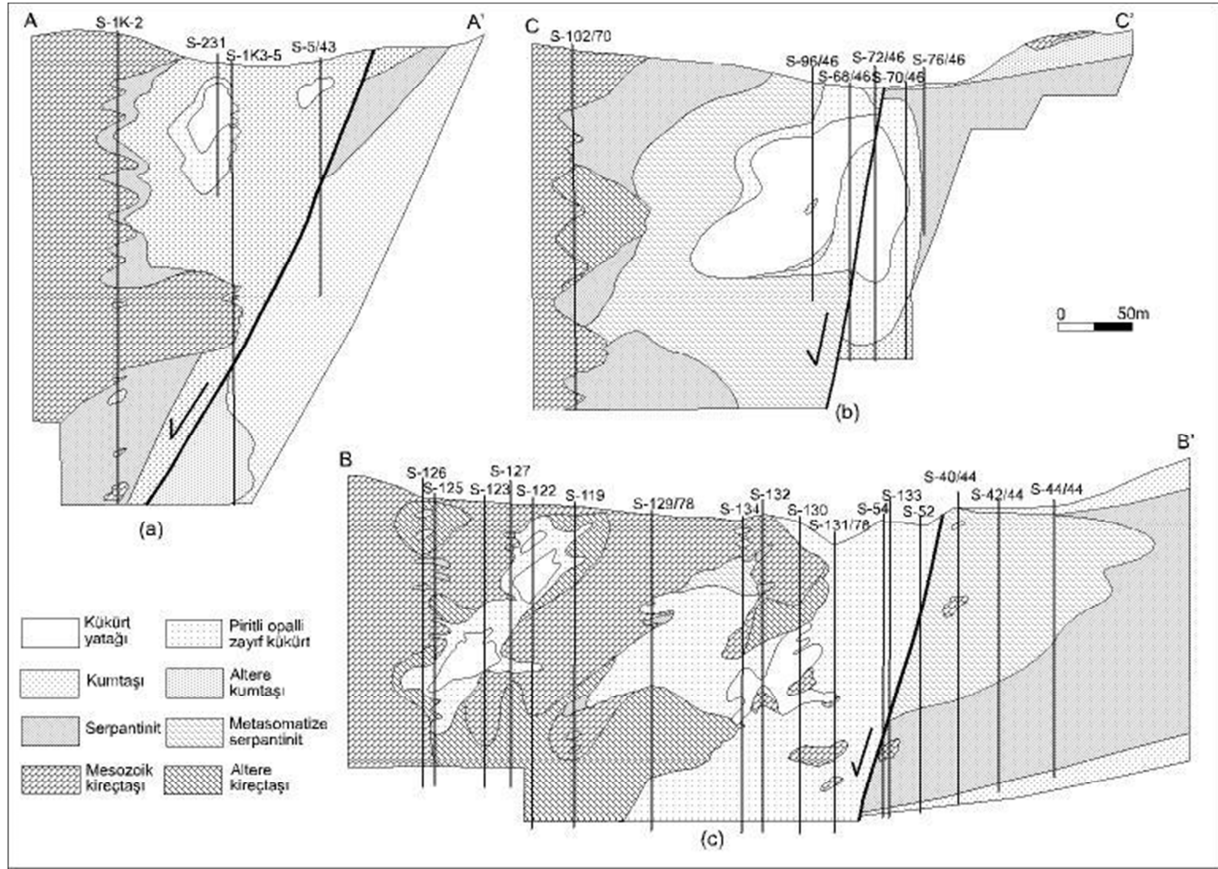
sürdüğünü belirtir. Diğer taraftan, transform fay zonu üzerindeki eş yaşlı volkanik ürünler tamamiyle alkaleli karakterdedir. Bu alkaleli volkanizma, Afyon-Isparta-Antalya yapısal uzantısı üzerinde kuzeyden güneye doğru gençleşme göstermektedir (Şekil.1). Yazarlar, transform fay sisteminin sağ yanal atım periyodlarında fay yarıklarında dengeli manto yükseliminin gerçekleştiğini yorumlamışlardır.



Şekil 3. Keçiborlu-Değirmendere kükürt ocağı sahasının jeoloji haritası ve kesitleri (7).

3. VOLKANİK YAPI

(1) ve (2), Batı ve Orta Anadolu magmatizmasının, Erken Miyosen kalk-alkaleli volkanizma ile başladığını ve Orta Miyosen'e kadar devam ettiğini ve daha sonra şoşonitik-alkaleli volkanizma ürünlerinin Kuvaterner'e kadar



Şekil 4. Keçiborlu-Değirmendere kükürt ocağından geçen jeolojik kesitler (Kesit güzergahları Şekil.3'deki haritada gösterilmiştir) (7).

Keçiborlu kükürt ocakları, Isparta ve Afyon volkanizmaları arasındaki bir lokasyonda yaklaşık bu transform fay sisteminin üzerinde yer almaktadır. Ocakların yer aldığı sahada fay zonu boyunca bir yeraltı mağma sokulumundan kaynaklanan olası sıcak nokta, yüzeyde 4.5km uzunluğunda ve 250m genişliğinde şiddetli metasomatik alterasyona yol açmıştır (Şekil.1). Söz konusu derin yeraltı sokulumunu doğrudan inceleme imkanı olmadığı için, olası varlığı, civar verilerin yorumlanmasıyla ortaya konulmaktadır.

Benzer tipte kükürt oluşumları Japonya'da görülebilmektedir. Transvers faylarla volkanik cephenin (doğu Japonya yeşil tuf mağmatik yayı) kesişme noktalarında birkaç kükürt yatağının yoğunlaştığı rapor edilmektedir. Sismik verilere dayanılarak (10) tarafından bu transvers faylar, yitim plakası üzerindeki okyanusal transform faylarının devamı olarak kabul edilmiştir (11).

Özellikle, transverse faylarla hidrotermal kükürt yatakları yoğunluğunun harikulade çakişması rapor edilmektedir.

(12); kükürtlü volkanik gazların çoğunlukla mağmanın solfatar faaliyeti sürecinde çıktığını ve mağmanın yan kayaç ve yeraltı suyu ile karıştığı yerlerde bu solfatar faaliyetin arttığını belirtmektedir. (13); alkalin kayaların, toleitik kayalardan daha çok orijinal kükürt içerdiğini

belirtmiştir. Diğer taraftan, kalkalkalen kayalardaki solfatarlara, alkalin kayalardan daha az rastlanmaktadır. (14) de, mağmanın daha fazla yabancı materyel ile karışımı sürecinde solfatar faaliyetin şiddetlendiğini düşünmektedir. Bu tip kayalar, bol zenolitli mineraller içerir ve bileşimleri hiperstin andezittir.

Keçiborlu kükürt ocaklarına en yakın ekstrüf volkanik faaliyet, ocakların 25km GD yer alan Isparta volkanizması sahası olup faaliyetlerine Orta Pliyosen'de başlamıştır. Proklastik basal-surge tüfleri, Gölcük kalderası etrafında çökelmiştir. Gazlı volkanizma ürünü pomza çökelleri, bunların üzerinde bulunur (15). Söz konusu patlayıcı volkanizmanın ardından traki-andezitler ve latitler yarıklar boyunca yükselmiş, sokulumlar ve lav akıntıları oluşturmuştur. Kükürtlü gaz ve buhar çıkışları, Yakaören köyü (Isparta) güneyinde faylarla ilgili olarak bulunmakta ve solfatar volkanizma fazını temsil etmektedir (Şekil.2). Kükürt ocaklarının güneydoğusundaki Isparta alkalin volkanik kayaları, Geç Pliyosen'de indifa etmiştir.

4. YERALTI VOLKANİZMASI KÖKENLİ KÜKÜRT YATAKLARI

Kükürt fay zonu boyunca görülen şiddetli yüzey alterasyon mostraları, bazı öncel araştırmacılar tarafından "liparit daykı" veya "tüf" olarak adlandırılmıştır (16). Gerçekten, bu altere kayalar tüf veya gri, silisli volkanik kül görümüne sahip olmakla beraber, alınan örneklerin petrografik analizleri, bunları opalize ultrabazik kayaç olarak adlandırmıştır (Şekil.3). Örnekler, ofiyolitik ağ dokusu içinde tamamiyle opalleşmiştir. Kataklastik dokulu pirit ve manyetit opak mineral olarak bulunur. Daha az altere olmuş serpantin bölümler, serpantinik ağ dokusu içinde opalleşme ve killeşme gösterir.

Opalize kireçtaşların petrografik analizleri, opal, kil ve demiroksit minerallerini saptamıştır. Kireçtaşı, ornatma ile beyaz renkli. opale dönüşmüş ve CaCO_3 tamamiyle erimiştir. Çok az demiroksit, ultrabazik mineraller veya kromit de yapıya girmiştir.

Ocaklar sahasında kükürt fay zonu içindeki çeşitli ana kayaçlar, metasomatizma yoluyla şiddetli alterasyona uğramıştır. Hepsi, az veya çok silika ile ornatılmış, özgül ağırlıkları azalmış ve ısı ve kimyasal reaksiyonlarla orijinal renkleri değişmiştir. Bu nedenle el örneklerinin alterasyon olmadan önceki orijinal kayacını tayin etmek çok zordur. Bununla beraber, arazide fay zonu sınırlarında ana kayaçların altere ve altere-olmayan kısımlarını ayırmak mümkündür (Şekil.3).

Kükürt cevheri kütleleri, tabakalı yapıya sahip olmayıp yeraltı kükürt ocaklarında dışa doğru konsantrik, masif, piritli, opalli ve killi alterasyon zonlarıyla çevrilmiştir (Şekil.4). Örneğin, Değirmendere ocağı ana cevher kütlelerinin boyutları; 230m uzunluğa, 110m genişliğe ve 210m derinliğe sahiptir. Bu şekilsiz cevher kütleleri, 50 - 70⁰ GB- eğimli fay zonu içinde ve bu zonun eğimine paralel konumda gelişmişlerdir (Şekil.4).

Cevher kütleleri içinde hem monoklinik ve hem de ortorombik kükürt kristallerinin bulunuşu, mağmatik köken için diğer bir veri oluşturmaktadır. Sedimenter kökenli kükürt mineralleri sadece ortorombik kristal yapısına sahiptir ve monoklinik kükürt kristallerin bir kısmı, soğuma sürecinde ortorombik yapıya dönüşmekle beraber volkanik kökeni belirtir (17).

Yüzeyde mağmatik sokulum görülmemekle beraber, kükürt ocakları altında, fay zonunda yeraltı volkanik sokulumun varlığını düşünmek mantıklıdır. Çünkü, ocak alanlarının dışında fay zonunun örtülü olmayan devamında hiçbir hidrotermal alterasyon mostrasına rastlanmamaktadır. Bugün bile, yeryüzünde ve çalışan işçilerin sağlığı için temiz hava pompalayan kompresörlerin kullandığı yeraltı galerilerinde aktüel zehirli SO_2 ve H_2S gazların çıkışı devam etmektedir. Bu kükürtlü gaz çıkışlarına, ocaklar bölgesi fay zonu dışında rastlanmaz. Yeraltı kükürt işletmelerinde ve arama sondajlarında mağmatik sokulum kesilmediği için bu sokulumun ocakların çok altında bulunması olasıdır (Şekil.4).

Yeraltı volkanik sokulumu, olasılıkla kükürt fay zonuna yerleşmiştir. Derindeki mağmanın, gerilim fay zonuna veya yanatımlı fayın düşen blok tarafına girmesi, bu sokulumun gelişmesi için yeterlidir. Keçiborlu kükürt yatakları, bu tip bir sokulumun fay zonu boyunca çıkan kükürtlü gazlarından oluşmuştur.

5.KÜKÜRT CEVHERLEŞMESİNİN ÖZELLİKLERİ VE CEVHERLEŞMEYİ KONTROL EDEN FAKTÖRLER

5.1. Yan Kayacın Fiziksel Özellikleri

Özellikle yeraltı kükürt yataklarının en dış bölümlerindeki ocak galerilerinin ofiyolitik duvarlarında çeşitli boyutlarda bol kireçtaşı bloklarının ve daha az fliş ve radyolarit bloklarının açığa çıktığı görülmektedir. Bu blokların bazıları, kükürt fay zonu içindeki genç tektonik hareketlerden etkilenmiştir.

Kükürtçe zengin cevher kütlelerinin dışında altere zonlarda ofiyolitik ana kayaç dokuları genellikle seçilebilmektedir. Örneğin, kükürtçe fakir cevherde, masif, milonitleşmiş serpantinik yapı ve orijinal ağ dokusu sistemi görülebilir. Eklemler kükürt ile doldurulmuş ve serpantinik ana kayaç koyu renkli piritli kile dönüşmüştür. Keçiborlu kükürt cevherinde bol mikrokristalen pirit veya metal sülfidler bulunduğu için rengi grimsi sarıdır. Kükürt oranı arttıkça cevher gevreklik, parlaklık ve sarı renk kazanır (Şekil.5.a.b.c).

Kükürt cevherinin petrografik analizleri, bol kükürt kristalleri yanında ikincil opal, pirit ve kil minerallerinin de bulunduğunu göstermektedir. Zayıf kükürt cevherinde ise, kükürt, opalleşmiş serpantin içindeki çatlakları doldurur.

Daha önce belirtildiği gibi kükürt cevherinin ana kayacı, ofiyolitik karmaşıktır. Ofiyolitik ana kayaç içerisindeki ince kristalli, gözeneksiz Mesozoik kireçtaşı blokları, sadece zayıf bir alterasyon geçirmiştir. Özellikle ofiyolitik kayaçları örten çok büyük allokton, kristalen kireçtaşı kütleleri, kükürt içeren fay zonunda yükselen mağmatik gaz ve sıvılar için "örtü kayaç" rolünü oynamıştır (Şekil.4c).

Yan kayacın fiziksel ve kimyasal özellikleri, kükürt mineralleşmesinin gelişiminde ve yer değişiminde büyük bir öneme sahiptir. Lokal olarak, yüksek ve düşük tenörlü kükürt cevheri arasındaki sınır, gözenekli ve gözeneksiz yan kayaç arasındaki sınırla çakışır. Gözenekli yan kayaç içerisindeki kükürt cevheri, gözeneksiz yan kayaç içerisindeki cevherden daha zengindir (Şekil.5b). Gözenekli yan kayaç, mineralleşme sıvılarına geçiş yolları ve elementer kükürde oksitlenmeyi sağlayarak kükürt mineralleşmesini kolaylaştırır. Gözenekli kayalarda meteorik sularla mağmatik sıvı ve gaz çıkışları kolaylıkla karışır. Bu nedenle, ağarma, asitli (H_2SO_4) ikincil sıvıların sızması ve mağmatik gaz ve sıvı çıkışlarının oksitlenip elementer kükürdü çökeltmesi (Şekil.5c) gözenekli kayalarda kolaylaşır (12).

5.2. Yeraltı Suyuna Doygun Zonun Önemi

Keçiborlu işletme alanı içerisindeki tüm yeraltı kükürt yatakları, dere vadileri içinde bulunur ve her bir kükürt yatağı da adını o dereleden alır. Diğer taraftan, yeraltı işletme galerilerinde su basmasını önlemek için, galeri duvarlarından sızan sülfürik asitli sular, pompalanıp ocaktan dışarı atılmaktadır. Bu nedenlerle kükürt yatakları, suya doymuş ortamda bulunur.

Kükürt cevherleşmesi, kükürtlü gazların ve mineralize sıvıların oksitlenmesiyle oluşur. Bünyesinde eriyik halinde sülfürik asit ve oksijen bulunduran yeraltı meteorik suları; 30 m'nin altında hava dahil hiçbir diğer oksitleyici yeraltı faktörü bulunmadığı için, yeraltı kükürt cevherleşmesinin 50m - 250m arasında oluşmasında, elementer kükürde oksitleyici rol ve yan kayaç kimyasını değiştirici rol oynamıştır (Şekil.5c).

Kükürt cevheri etrafındaki alterasyon zonlarının üst kısımlarında opalleşmenin yayılması (Şekil.3 ve 4a,b) yüzey mostralarına da yansır ve buralarda killeşme görülmez. Bu nedenle opalleşmenin alterasyon ortamı asitlidir. Havanın oksijeni 24 - 30m derinliklere kadar sızabilir; böylece, bu üst zon şiddetli asit sızıntılı alanı kapsar. Araştırma sondajlarında montmorillonitik killer genellikle kükürt cevherinin altında bulunur ve alkalin şartlarda oluşur. Halbuki her iki taraftaki yan kayaç aynı olup serpantinittir. Kükürt cevheri kütleleri etrafındaki alterasyon zonları, yukarı doğru genişleyip mantar şekli almaktadır (Şekil.4)

Sondajlar, ocakların bulunduğu alanda yeraltı kükürt cevherleşmesi maksimum derinliğinin 250m'yi geçmediğini göstermiştir. Kükürt cevheri kütlelerinin köklerini birleştiren düzlem, yaklaşık yüzey topoğrafyasına paraleldir ve suya doymuş zona işaret eder (12) çünkü kükürt cevherleşmesi, topoğrafya aşınma etkisinin çok az olduğu derecede gençtir.

5.3. Kükürt Cevher Kütlelerinin Etrafındaki Alterasyon Zonları

Keçiborlu yeraltı ocaklarında kükürt cevheri kütleleri etrafında eş merkezli, metasomatik zonlaşma görülür. Kükürt cevheri merkezde yer alır ve eşmerkezli alterasyon zonları bu cevheri sarar böylece: 1- piritli zon, 2- opalli zon, 3- killi zon ve 4- altere yan kayaç zonlarının kükürt kütlelerini dışa doğru sardığı görülür (Şekil.4).

Piritli zon, mikro kristalen markasit ve kum boyu pirit kristallerinden ötürü siyah renge sahiptir (Şekil.5c). Piritli zondan alınan örneğin petrografik analizi, bol mikrokristalen pirit ve daha az miktarda ikincil opale işaret eder.

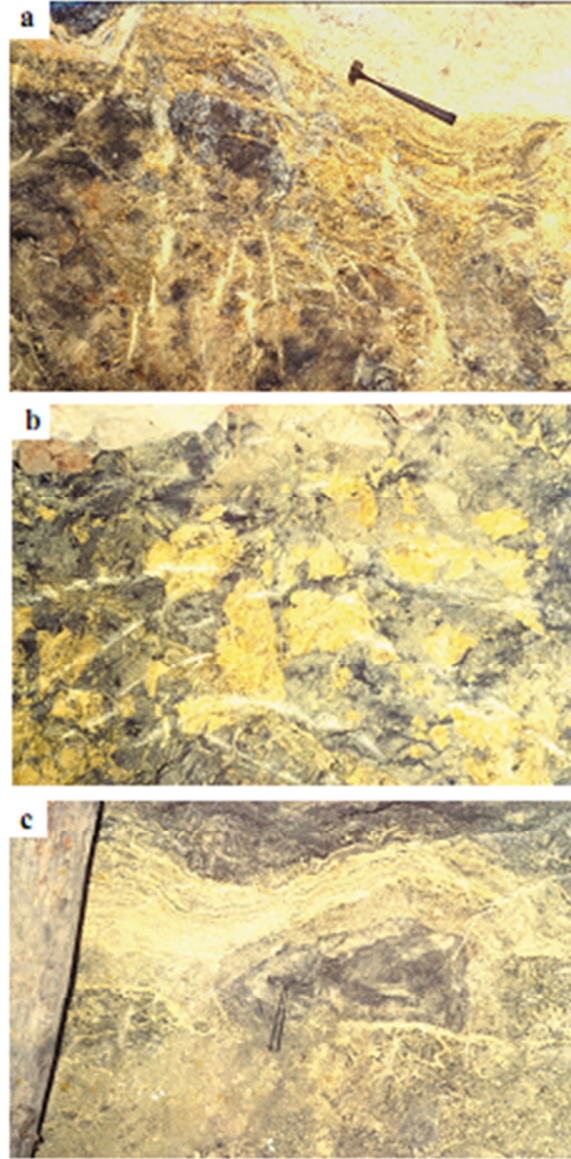
Opalli zon ise, gri bir kil hamuru içinde alacalı gri, beyaz ve açık yeşil renkli opallere sahiptir (Şekil.5a). Killi zonda, iç kısımda mikrokristalen piritli siyah killerin dış kısıma doğru göreceli olarak yeşil killere geçiş yaptığı görülür. Yeşil montmorillonitik ve kloritik killer, serpantinolitik kökene işaret eder. Opalli zonun bazen piritli zondan önce geldiği yerler vardır (Şekil.5a). Bu zonların genişlikleri, 0m ve 30m arasında değişir. Kükürt cevherinin bir kenarında bulunmayan (0m genişliğindeki)

herhangi bir zon, diğer bir kenarında çok büyük genişliklere ulaşabilmektedir.

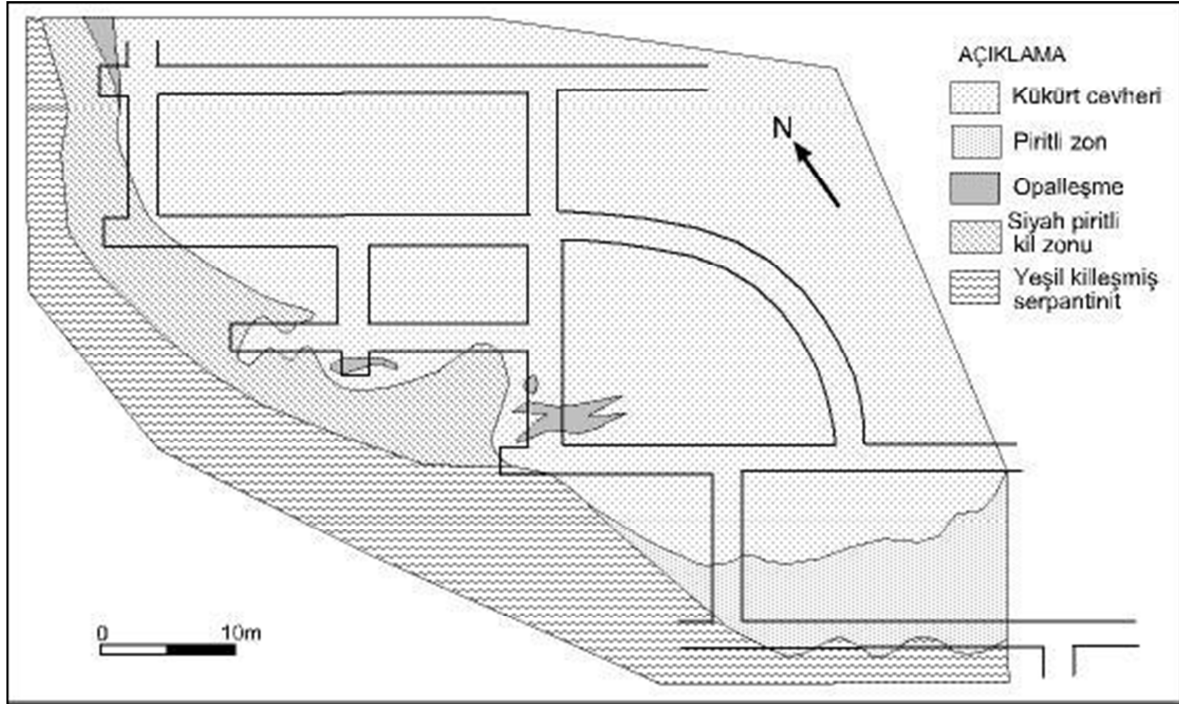
Yeraltı galerileri duvarlarında alloktan kireçtaşı bloklarının lokal olarak elle ezilebilecek derecede sabunlaştığı görülmektedir. Benzer şekilde, bazı opalli parçaların da sabunlaştığı görülmektedir.

Tüm metasomatik alterasyon, tek bir mineralleşme fazında gelişmiştir. Bunun verilerini şöyle sıralayabiliriz:

- 1- Alterasyon zonlarının hiçbiri, cevher kütlelerini kesmez.
- 2- Eklem ve fayların kesişme noktası, kükürt mineralleşmesinin merkezinde yer almakla beraber, her bir kükürt yatağının etrafında birbirini takip eden alterasyon zonları benzer sıralanma göstermektedir.
- 3- İçteki alterasyon zonu, daima dış bitişik zonu ornatar veya dış zona doğru ilerler.
- 4- Dış zonun altere bölümleri, ilerleyen komşu iç zonun dış kenarlarında bulunabilir. Şekil.6'da opalli kaya lekeleri, gelişen kükürt kütlelerinin dış kenarlarında görülmektedir.
- 5- Bir altere zondan diğerine geçiş tedricidir; keskin kontaklara çok az rastlanır. Bu zonların zamanla tedricen dışa doğru hareket etmesi ve genişlemesi mantıktır. Bu veriler, Japon hidrotermal kükürt yatakları verilerince de onaylanmaktadır (11).
- 6- Kükürt yatakları, birbirinden ayrı kütleler halinde bulunur ve etraflarındaki alterasyon zonları, yukarı doğru mantar şeklinde genişler (Şekil.4).
- 7- Kükürt cevherleri kütlelerinin bazı kenarları, kireçtaşı bloklarınca kontrol edilir (Şekil. 4c ve 5a). Alloktan kireçtaşı blokları, yükselen kükürtlü gazların yukarı çıkmasını engellediği için oluşan kükürt cevherinin üstünde örtü kayacı olarak da rol oynar (Şekil.4c).



Şekil 5. Fotoğraflar kükürt cevheri oluşumlarını sergilemektedir. **a.** Galeri duvarında kükürt cevheri sınırları açığa çıkmıştır. Sarı renkli bölümler, kükürt cevherini temsil eder. Sağ üst köşedeki bej renkli alan kükürt cevherini sınırlayan bir kireçtaşı bloğudur. Koyu renkli kısımlar, komşu piritli zonun kesitlerini temsil eder. Alacalı gri-açık yeşil renkli kısımlar, opalli zonun kesitlerini temsil eder. **b.** Kükürt cevherleşmesi, tektonik olarak breşleşmiş ana kayaç dokusu görünümünü belirginleştirmiştir. Zengin elementer kükürt içeren sarı renkli 3x12cm boyutlu köşeli parçalar, etrafındaki siyahımsı renkli piritli ve killi litolojiye göre daha çok gözenekliğe ve geçirgenliğe sahiptir. **c.** Sarı kükürt cevheri ve koyu renkli piritli zon arasındaki sınır fotoğrafın üst bölümünde görülmektedir. Sarı kükürt, sülfürik asitli ikincil sıvı sızmalarının çizgisel gözenekleri doldurmasıyla çöklemiştir (photographs showing the occurrences of underground sulphur ores).



Şekil 6. Keçiborlu Değirmendere kükürt yatağı (+870m kotu) seviyesi sınırının yer altı jeoloji haritası (7).

4.4. Hidrotermal Alterasyonun Kimyası

Orijinal ve altere kayaların ana kimyasal bileşim değişimlerinin hesaplanmasında hacim önemli bir faktördür. Kükürtlü, piritli ve opalli zonlar gibi yeraltı ocağı alterasyon zonlarını çapraz kesen yapıya ve yan kayacın orijinal sınırlarında önemli hiç bir değişikliğe rastlanmamıştır. Bu nedenle solfatarik alterasyon sürecinde orijinal kaya hacminde hiçbir görünür değişiklik gelişmemiştir. Bununla beraber, altere kayalar genellikle açık renkli olup altere olmamış ofiyolitik yan kayaçtan daha fazla silika ve gözeneklilik oranına sahiptir.

Sabit hacimli metasomatik olaylarda, kükürt cevheri yan kayacının alterasyon kimyası, major oksitlerin ilavesi ve çıkarılmasıyla tayin edilir. Altere yan kayaç ve bunun içine yerleşen kükürt cevheri arasında hiç bir hacim değişikliği bulunmadığı takdirde, major oksit yüzdelерinin ana kayaç özgül ağırlıklarıyla çarpımı, bu oksitlerin birim hacimdeki ağırlıklarını verir (Tablo.1). 130 no.lu örnek; kükürt cevherleri etrafında yaygın

olarak bulunan altere yan kayacın yaklaşık ortalama major oksit yüzdelерini temsil edecek şekilde seçilmiş olup, diğer örnekler ise bitişik kükürt cevherinin major oksit yüzdelерini verir (Tablo.1). Kükürt cevherlerinin, etrafındaki ortalama altere kayaca göre oksit oranları kayıplarının veya artışlarının hesaplanması mümkündür (Tablo.2) (18).

Altere olmamış ortalama yan kayacın kimyasal analizleri (Tablo.1'deki 146 no.lu örnek), mineralleşme sıvılarından yan kayaca silika, potasyum, fosfat ve bir kısım demir ilave edildiğini göstermektedir. Çünkü söz konusu element oksit yüzde oranları, altere olmamış serpantin hamurlu ofiyolitik karmaşığın sahip olduğu yüzde oranlarından fazladır. Diğer taraftan, büyük oranlarda magnezyum, kalsiyum ve manganezin orijinal serpantin yan kayaçtan sıvı sızıntılarla ayrıldığı gözlenmektedir (Tablo.1 ve 2). Bu alterasyon, kimyasal olarak asit sızıntı etkinliği şeklinde tanımlanır.

Ortalama altere kayacın major oksit oranları (örnek no.130), bitişik kükürt cevherleri major oksitleriyle karşılaştırıldığı zaman (Tablo.2), kükürt cevherleri

Tablo 1. Keçiöborlu kükürt cevheri birim hacmindeki oksit ağırlıkları (oksite % x özgül ağırlık (18)).

Sample No.	1.30	2/873		5/873		13A/870		12/870		7/870		1/870	
Oxides	altered host rock oxide weights	sulphur ore oxide weights	gains(+) losses(-)	sulphur ore oxide weights	gains(+) losses(-)	sulphur ore oxide weights	gains(+) losses(-)	sulphur ore oxide weights	gains(+) losses(-)	sulphur ore oxide weights	gains(+) losses(-)	sulphur ore oxide weights	gains(+) losses(-)
SiO ₂	121.26	0.01	-121.25	1.12	-120.14	21.50	-99.76	6.30	-114.96	0.38	-120.8	1.50	-119.76
Al ₂ O ₃	23.50	4.11	-19.39	2.65	-20.85	17.28	-6.22	7.63	-15.27	1.30	-22.20	---	-23.50
Fe ₂ O ₃	5.26	8.10	2.84	13.89	2.63	2.19	-3.07	8.96	3.70	10.6	5.34	1.67	-3.59
FeO	4.71	0.12	-4.59	1.46	-3.25	0.12	-4.59	0.08	-4.63	1.54	-3.17	0.18	-4.53
MgO	1.50	0.07	-1.43	0.02	-1.48	0.04	-1.46	---	-1.50	---	-1.50	---	-1.50
CaO	3.38	0.54	-2.84	---	-3.38	0.02	-3.36	0.02	-3.36	---	-3.38	---	-3.38
MnO	0.03	---	0.03	---	-0.03	---	-0.03	---	-0.03	---	-3.03	---	-0.03
K ₂ O	2.12	0.03	-2.09	0.04	-2.08	0.04	-2.08	0.02	-2.10	0.01	-2.11	0.01	-2.11
Na ₂ O	4.41	0.03	-4.38	0.08	-4.33	0.06	-4.35	0.06	-4.35	0.04	-4.37	0.05	-4.36
TiO ₂	2.12	0.12	-2.00	---	-2.12	---	-2.12	---	-2.12	---	-2.12	---	-2.12
P ₂ O ₅	0.01	1.04	1.03	0.08	0.07	0.18	0.17	0.48	0.47	0.06	0.05	0.11	0.10
S	---	160.7	160.7	172.5	172.5	137.4	137.4	168.5	168.5	119.5	119.5	183.0	183.0

Tablo 2. Keçiborlu kükürt ocağındaki ayrılmış ve ortalama ayrılmamış ana kayaçların ve kükürt cevherlerinin oksit yüzdeleri (18).

Örnek no	146	130	2 / 873	5 / 873	13A/ 870	12 / 870	7 / 870	1 / 870
Oksitler %	Ayrılmış serpantinit (ana kaya)	Ayrılmış ana kayanın ortalama oksit ağırlıkları	Kükürt cevheri oksit ağırlıkları	Kükürt cevheri oksit ağırlıkları	Kükürt cevheri oksit ağırlıkları	Kükürt cevheri oksit ağırlıkları	Kükürt cevheri oksit ağırlıkları	Kükürt cevheri oksit ağırlıkları
SiO ₂	39.40	64.50	0.01	0.55	10.70	3.00	0.25	0.80
Al ₂ O ₃	0.70	12.50	2.25	1.30	8.60	3.80	0.85	---
Fe ₂ O ₃	3.44	2.80	4.43	6.81	1.09	4.46	6.93	0.89
FeO	1.50	2.51	0.07	0.72	0.06	0.04	1.01	0.10
MgO	38.50	0.80	0.04	0.01	0.02	---	---	---
CaO	0.50	1.80	0.30	---	0.01	0.01	---	---
MnO	0.10	0.02	---	---	---	---	---	---
K ₂ O	0.01	1.13	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
Na ₂ O	0.14	2.35	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
TiO ₂	0.03	1.13	0.07	---	---	---	---	---
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.57	0.04	0.09	0.24	0.04	0.06
S	---	---	87.82	84.57	68.39	83.88	78.15	97.36
Özgül ağırlık	2.42	1.88	1.83	2.04	2.01	2.01	1.53	1.88

bünyesinde sadece kükürt ve demir oksit yüzdelerinin arttığı ve diğer oksitlerin ise azaldığı görülür. Bu nedenle kükürt cevheri oluşumunun daha ileri safhasında, mineralleşme sıvılarının oksitlenmesiyle sadece kükürt ve demir oksit çökelmiş ve asitli suya doygun ortamda diğer oksitler sızıp altere kayadan dışarı atılmıştır (Şekil.5c).

(12), bu materyallerin sıvı eriyiklerle taşındığını ve difüzyon yoluyla taşınmadığını belirtmiştir. Kükürt, altere kayacın gözeneklerine ve geçirgen kısımlarına çökelmiştir (Şekil.5a.b.c). Bununla birlikte, opal ve bazı gözenek solüsyonları gibi jel materyaller, lokal olarak difüzyon yapabilmektedir.

5. SONUÇLAR

a. Keçiörlü kükürt yatakları, Pliyosen zamanında muhtemel traki-andezitik yeraltı volkanizmasının sokulum yapmasıyla, şiddetli metasomatizmaya uğramış ofiyolitik yan kayaçları kesen oblik atımlı fay zonunda gelişmiştir.

b. Kükürt yatakları, fay zonu doğrultusuna paralel, düşen blok tarafında ve akarsu vadileri altında zincirleme şekilde yer almaktadır. Suyu doygun metasomatik ortam oluşturan gözenekli fay kesişme lokasyonlarında gelişmiştir

c. Yan kayacın fiziksel ve kimyasal özellikleri ve meteorik suya doygunluğu, kükürt mineralleşmesinin gelişiminde ve göçünde önemli etkene sahiptir. Zengin ve fakir kükürt cevherleri arasındaki sınır, lokal olarak gözenekli ve gözeneksiz yan kayaç arasındaki sınırla çakışır. Böylece, gözenekli yan kayaç içindeki kükürt cevheri, gözeneksiz yan kayaç içindeki kükürt cevherinden daha zengindir. Gözenekli yan kayaç, hem mineralleşme sıvılarına geçiş imkanı ve hem de meteorik su bünyesindeki erimiş oksijen ile elementer kükürdün çökmesini sağlayıp kükürt cevherleşmesini kolaylaştırmıştır.

d. Merkezi kükürt cevheri kütlesi, sırasıyla eş merkezli 1- piritli, 2-opalli, 3- killi, 4- altere yan yakaç zonlarıyla kuşatılmıştır. Bu alterasyon, tek bir mineralleşme safhasında gelişmiş olup etrafındaki alterasyon zonlarının hiç birisi cevher kütlesini kesmez.

e. İç alterasyon zonu, daima dış zonu ornatır veya dış zona doğru ilerler. Dış zondaki alterasyon yamaları, bitişik iç zonun dış kenarına yakındır. Bir altere zondan diğerine geçiş tedrici olup birkaç keskin sınıra da rastlanmıştır. Zamanla bu zonlar dışa doğru genişleyip göreceli hareket edebilir.

f. Kükürt cevher kütlelerinin bazı kenarları, ofiyolitik ana kayaç içindeki allokton kireçtaşı bloklarıyla kontrol edilir. Kireçtaşı blokları, yükselen kükürtlü gazları tutup kükürt cevherlerinin üzerinde örtü kayacı rolünü oynamıştır.g. Altere kayalar genellikle açık renkli olup ofiyolitik yan kayaçtan daha çok gözenekliliğe ve silika içeriğine sahiptir. Altere olmayan, serpantin hamurlu

ofiyolitik karmaşığa göre yüksek kimyasal içeriklere sahip olan ortalama yan kayacın kimyasal analizi; mineralleşme sıvılarının yan kayaca silika, potasyum, bir kısım demir, titanyum ve sodyum verdiğini belirtmektedir. Diğer taraftan, büyük oranda magnezyum, kalsiyum, manganez ve bir kısım alüminyum orijinal serpantinli kayalardan sızıp dışarı atılmıştır. Bu kimyasal kayıp, sülfürik asitli suların eritme ve sızıntı etkinliğiyle tanımlanır.

h. Altere yan kayacın ortalama major oksit yüzdeleri, bitişik kükürt cevherinin major oksit yüzdeleriyle karşılaştırıldığı zaman, kükürt cevherinde sadece kükürt ve ferrik demir oranlarının arttığı ve diğerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu nedenle, kükürt cevheri oluşumunun daha ileri safhasında mineral sıvılarının oksitlenmesiyle sadece kükürt ve ferrik demir çökelmiş ve asitli suya doygun ortamda diğer oksitler, sonunda bitişik alterasyon zonlarına doğru sızıntıyla dışarı atılmıştır.

TEŞEKKÜR

Makale, proje başkanlığı yaptığım Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü ile Etibank Genel Müdürlüğü arasındaki ortak kükürt aramaları projesi sonuçlarının özetidir. Bu projeye katkıda bulunan tüm MTA ve ETİBANK personeline teşekkür ederim. Makale hakemliğini ve düzeltmelerini yapan Dr. Y. Kajiwara ve Dr. H. Shimazaki'ye de müteşekkirim.

KAYNAKLAR

- [1] Savaşçın, M.Y. ve Oyman, T., 1998; "Tectono-Magmatic Evolution of Alkaline Volcanics at the Kırka-Afyon-Isparta Structural Trend, SW Turkey". *Turkish Journal Of Earth Sciences*, 7, 201-214 (1998).
- [2] Francalanci, L., Innocenti, E., Manetti, P. ve Savaşın, M.Y., "Neogene alkaline volcanism of the Afyon-Isparta area, Turkey: petrogenesis and geodynamic implications", *Mineralogy and Petrology*, 70, 285-312 (2000).
- [3] Şengör, A. M. C. ve Yılmaz, Y., 1981; "Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach". *Tectonophysics*, 75, 181-241.
- [4] Seyitoğlu, G. ve Scott, B., "Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey". *Geological Magazine*, 128, 155-166 (1991).
- [5] Gürçan, E. ve Yeğenoğlu, H., 1978; "Etibank Keçiörlü kükürt işletmesi faaliyet raporu" *ETİBANK*.
- [6] Özgüner, A. M., 1996; "Kükürt hakkında Özel İhtisas Komisyonu Raporu", *Devlet Planlama Teşkilatı 7. Beş Yıllık Programı*,106.
- [7] Özgüner, A. M., Fişekçi, A., Kılıç, İ., Özgönül, E., Ölmez, M., Akıncı, A. ve Taş, N., "Keçiörlü

- kükürt yataklarının jeolojisi”, *MTA Derleme Rapor No.2502*, 85-87 (1989).
- [8] Bingöl, E., “Doğrultu atım sorunu ve jeolojisi”, MTA Yayınları Eğitim Serisi, 28, 28-41 (1986).
- [9] Cihan, M., Saraç, G. ve Gökçe, O., “Insights into biaxial extensional tectonics: an example from the Sandıklı Graben, West Anatolia, Turkey”. *Geological Journal*, 38, 47-66 (2003).
- [10] Carr, M.J., Stoiber, R.E. ve Drake, C.L., “Discontinuities in the deep seismic zones under the Japanese arcs”. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 84, 2917- 2930 (1973).
- [11] Mitchell, A.H.G. ve Garson, M.S., “Mineral Deposits and Global Tectonic Settings”, *Academic Press Geology Series*, (1981).
- [12] Mukaiyama, H., “Genesis of sulphur deposits in Japan”, *Journal of the Faculty of Science, University of Tokyo*, 67-122 (1959).
- [13] Kuno, H., “Lateral variation of basaltic magma across continental margins and island arcs”. In “Continental margins and Island Arcs” (W.H. Poole, ed.), *Can. Geol. Surv. Paper 66-15*, 317-336 (1966).
- [14] Marinelli, G. ve Mittempergher, M., “On the genesis of some magmas of typical Mediterranean (potassic) suite”, *Bulletin Volcanologique*, 29, 113-140 (1966).
- [15] Kazancı, N. ve Karaman, E., “Gölcük (Isparta) Pliyosen volkanoklastiklerinin sedimenter özellikleri ve çökelme mekanizmaları”, *Akdeniz Üniversitesi, Isparta Mühendislik Fakültesi Bülteni*, 4, 18-35 (1988).
- [16] Guzzi, U., “Keçiörlü kükürtleri yeni ruhsat sahası etüdü”, *MTA Derleme Rapor No. 5884*, (1968).
- [17] Zoltai, T. ve Stout, J. H., “Mineralogy concepts and principles”, *Burgess Publishing Company, Minneapolis, Minesota, USA*, 379 (1984).
- [18] Sarıöz, K., “Keçiörlü Kükürt Yataklarının Oluşumu ve Yörenin Jeolojisi”. *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Türkiye*, sayfa.78-80, (1982).