

# *Magmatik Süreçlerde Altının Davranışı*

*Behavior of Gold in Magmatic Processes*

Ali Haydar GÜLTEKİN (\*)  
Yüksel ÖRGÜN (\*\*)

## ÖZET

Bu çalışmada, altının gabroik ve granitoid magmaların diferensiyasyonu sürecindeki davranışı, magmatik eriyiklerin kristalizasyonu esnasındaki bölünmesi ve metasomatik kayalarındaki konsantrasyon nedenleri tartışılmıştır. Orojenik kuşaklarda yer alan altın yatakları magmatizma ve metasomatizma ile cevherleşme arasındaki ilişkiyi yansıtan jeokimyasal indikatörler kullanılarak incelenmiş, altın yataklarının oluşum mekanizması ve tanımlayıcı parametreleri temel kimyasal özellikler dikkate alınarak sunulmuştur.

## ABSTRACT

This paper discusses the behavior of gold during the differentiation of gabbroid and granitoid magmas; its fractionation during crystallization of magmatic melts, and the reasons for the concentration of gold in metasomatic rocks. The concentrations of gold in orogenic regions are investigated by means of geochemical indicators of the relationships between ore mineralization and magmatism and metasomatism. The formation and characteristic features of the concentrations of gold, based on chemical composition, are also given.

(\*) Yrd. Doç. Dr., İTÜ Maden Fak., Ayazağa-İSTANBUL

(\*\*) Ar. Gör., İTÜ Maden Fak., Ayazağa-İSTANBUL

## madencilik

### 1. GİRİŞ

Günümüzde yerbHimcilerin ulaştığı bilimsel düzey ve laboratuvar imkanları nispetinde maden yatakları ile ilgili pek çok problem açıklığa kavuşturulmuş, özellikle de soy metallerin en ilgi çekenlerden biri olan altınla doğrudan ilişkili yoğun çalışmalarla magmatik ve metasomatik kompleksler içindeki davranışı daha iyi anlaşılmasına başlanmıştır. Çalışmaların yoğunlaştığı başlıca noktalardan biri orojenik kuşaklarda magmatizma ve metasomatizmayla altın cevherleşmesi arasındaki olası ilişkiyi ortaya koyan kantitatif jeokimyasal endikatörlerin neler olduğunun belirlenmesi olmuştur. Bu sayede asidik, nötr ve bazik bileşimli kayaçlar içindeki altın yataklarıyla ilgili önemli bazı sonuçlara ulaşmak kolaylaşmıştır.

Düşük tenörlü, ancak, büyük alanlar kaplayan pasifik tipi epitermal oluşumların da dahil olduğu ekonomik nitelikli altın yataklarının büyük bir bölümü, magmatik ya da metamorfik süreçlerle doğrudan ilişkilidir. Çoğu zaman, altının önemli bir kısmı, kayacın yapısında yer alan ve gelişimi aynı tür işlemlere bağlı olan diğer tür minerallerin, örneğin pirit, kalkopirit gibi minerallerin yapısında bulunur. Ancak volkanik kayaçlar ile volkanik etkinliklere bağlı çözeltilerin yerleştiği alanlar ve pirit içeren tortullar ile arjilitler, her koşulda altın bakımından daha umutlu ortamları oluşturmuştur.

### 2. ALTIN YATAKLARI HAKKINDA GENEL BİLGİ

Altın yatakları iki genel tipte gruplandırılır. Birinci gruba ekonomik oranda altın içeren kuvars damarları ile yan ürün olarak kazanıldıkları polimetallik yataklar girmektedir. Bu başlık altında, ikinci gruba giren ve oluşum şekil ve yataklanmaları farklılık sunan plaser tip yataklardan bahsedilmeyecektir.

Tektonik yönden aktif volkanik kuşaklar ile çoğunlukla Prekambriyen ve Mesozoik yaşlı yaygın şekilde deforme olmuş volkanik kuşaklarda kuvars damarları ve polimetallik tip cevherleşmeler altın istihsal edilen yatakların büyük bir çoğunluğunu oluşturmaktadır. İçinde

dolaştıkları çevre kayaçlardan kimyasal tepkimeler sonucunda metallerce zenginleşen çözeltiler deformasyonun daha ileri evresinde gelişen faylar ve makaslanma zonlarına ya da antiklinallerin doruklarına yerleşerek altın yataklarını oluştururlar. Yerleşme derinliği çoğu zaman 1000 metreden daha fazla değildir. Mo, As ve Sb içeren dasitik ve kuvars-feldspat karakterli porfiri Cu yatakları ile skarnların kontak zonlarında tonda bir kaç 10 grama kadar ulaşabilen miktarlarda altın bulunabilir ve kayaçların metamorfizması sonucu mobil hale geçen altın çözeltilerle taşınarak dayklar ve siler şeklinde bir oluşumla dissémine tür yataklar oluşturabilir.

Orojenik kuşaklarda yataklanmayı denetleyen jeolojik yapısal unsurlarla birlikte, olası bir mineralizasyon zonunu gösteren silisleşme, piropilitleşme, serizitleşme gibi alterasyonların altın yataklarının aranmasında birer klavuz olabileceği anlaşıldıktan sonra, ısı kaynağı bir magma olan cevher taşıyıcı çözeltilerin içerdikleri soy metalleri kolaylıkla bırakabilecekleri yüksek geçirgenli ve yaygın altere olmuş olan volkanikler altın madencileri için bir odak noktası haline gelmiştir. Genç volkanik kuşaklarda özellikle de andezit ve riyolitlerle ilişkili altınlı kuvars damarlarıyla, altın içeren polimetallik yatakların büyük çoğunluğu faylar ya da breş zonlarıyla yakından ilişkilidir. Son yıllarda bu tür yapıların saptanmasında hava fotoğraflarından da yaygın şekilde faydalanılmaktadır. Ancak altın içerebilen kuvars filonları sertlikleri nedeniyle çevre kayaca göre çıkıntılar oluşturduğundan arazi gözlemleriyle de saptanmaları kolaydır. Aplit, keratofir ve alaskit türü dayklar jenetik açıdan altın yataklarıyla ilişkilidir. Bu tip yataklar yüksek Au/Ag oranlarına sahip olmalarının yanısıra, pirit, pirotin, arsenopirit, kalkopirit, sfalerit, galen\* şelit ve altın tellürürlerden oluşan bir mineral topluluğu sunarlar. Genel bir yaklaşımla altınlı çözeltiler ya geç magmatik evrede çoğunlukla granitik bileşimli magmalardan beslenmiş ya da yan kayaç içerisinde dolaşan ısıtılmış meteorik sulardır.

## madencilik

Tortul ve volkanoklastik kayalarda görülen dissémine altın yatakları kökensel açıdan demirli formasyonlar, karbonatlı tabakalar veya piritli tortullarla ilişkilidir. Konglomeralar ve kuvarsitlere bağlı olanlar genellikle fosil karakter gösterirler. Grovak, şeyi ve kireçtaşları altın yönüyle oldukça fakirdir. Ancak volkanik kuşaklarla ilişkili olmaları halinde altın yönüyle umutlu olabilirler. Özellikle pirit, pirotin ve arsenopirit içeren tortul kayaların altın içeriği daha fazladır. Ultrabazik kayalarda yer alan

taya çıkmış olan sıcak su depolanmalarıdır. Oluşumlarının dayandığı başlıca nokta mineral içeren basınçlı sıcak suların kayalarla yaptığı kimyasal tepkimelerdir. Gelişim mekanizması bütünüyle volkanik bir sistem içinde düşünülür. Çoğunlukla meteorik ancak jüvenil su beslenmesinin mümkün olduğu sıcak sular yan kayalardan metalleri çözüp gözenek ve çatlaklar içinde tekrar çöktürme dışında, çevre formasyonlarda gözlenen etkin alterasyonlara da neden olurlar.

Çizelge 1. Magmatik Kayalarda Ortalama Au ve Ag İçeriği.

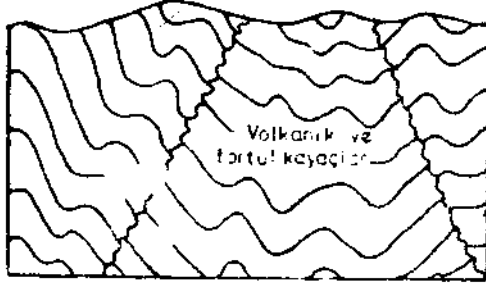
Kayaç Cinsi	Au Değişim aralığı (ppm)	Otalama Au (ppm)	Otalama Ag (ppm)	Analiz sayısı
Ultrabazik Kayalar	0,0002-0,7800	0,0114	0,08	1185
Lamprofirler	0,0007-0,0020	0,0016		15
Bazik Kayalar				
Entrüsifler	0,0003-0,6800	0,0230	0,14	1493
Ekstrüsifler	0,0001-0,2300	0,0174	0,11	1752
Nötr Kayalar				
Entrüsifler	0,0001-0,3500	0,0075	0,05	4710
Ekstrüsifler	0,0001-0,0650	0,0129	0,08	1359
Asitik Kayalar				
Entrüsifler	0,0002-2,9000	0,0114	0,05	3454
Ekstrüsifler	0,0001-0,1130	0,0037	0,05	372
Alkali Kayalar	0,0001-0,0135	0,0034	0,10	99

altın yataklarının kökeni tam olarak açık olmamakla birlikte araştırmacıların bir kısmı kaynak olarak ilksel magma bileşimini dikkate almakta diğer bir kısmı ise yapısal etmenlere bağlı bir oluşum modelini ileri sürmektedir. Ancak genel olarak ultrabazik kayalar altın bakımından fakirdir (Çizelge 1).

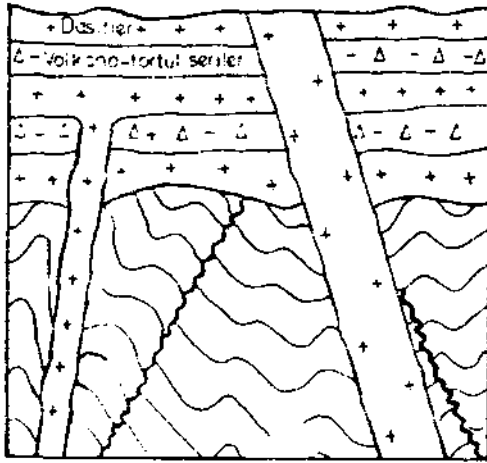
Son yıllarda, dünyadaki volkanların %80'inden fazlasını içermesi nedeniyle ateş kuşağı olarak adlandırılan bölgede yer alan Papua Yeni Gine'deki altın yataklarının yoğun incelenmesiyle elde edilen bulgular epitermal altın yataklarına olan ilgiyi büyük ölçüde artırmıştır. Bu ilginin temelinde tonda 2-3 gr kadar düşük tenörlerin ekonomik olarak işletilebilmesi yatmaktadır. Epitermal altın yatakları, çeşitli jeolojik ve yapı ortamlarda or-

Bugüne değin yapılan çalışmaların ortaya koyduğu şekliyle gerek altınlı kuvars damarlarının gerekse de altın içeren polimetâlik yatakların oluşumunda çoğunlukla volkanik kökenli olan bir temel karmaşığının metamorfizması başlangıç noktası oluşturmaktadır (Şekil 1). Temel karmaşık altın yönüyle ana çizgide iki farklı gruba ayrılır; Birinci grupta volkanik temele piritli tortular eşlik ederken, ikinci grup bazalt, kuvarsit ve arjilitlerden teşekküldür. Karmaşığın metamorfizmasını takiben etkin bir volkanizma, pizoklastik ve tortul adalanması şeklinde üst seviyelerde temeli örtmekte, daha derinlerde ise jeotermal etkinliklere yol açmaktadır. Olası maden yatağı esas olarak volkanizmanın neden olduğu ısı yükselmesiyle aktif hale geçerek temel karmaşıktan çözünen metallerce

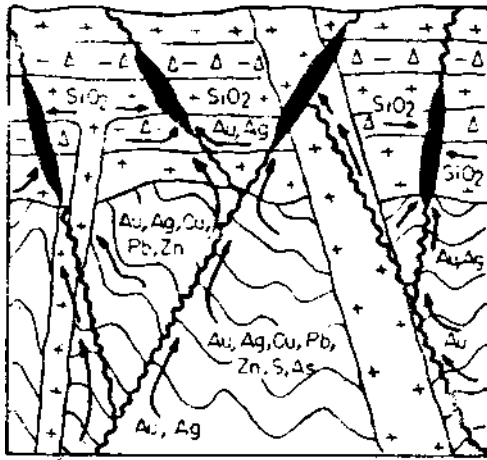
zenginleşmiş çözeltilerin yüzeye yakın alanlarda metallerini bırakması şeklinde bir gelişim gösterir.



a



b



c

**Şekil 1. Altın yataklarının oluşum evrimi**

(a) Metamorfizma geçirmiş çeşitli oranda Au, Ag, Cu, Pb, Zn içeren kıvrılmış ve faylanmış volkano-tortul temel karmaşığı, (b) Temel karmaşığın çoğunlukla andezit, piroklastikler ve tortullar tarafından üzerlenmesi. Etkin volkanizma jeotermal yükselmeye neden olmuştur, (c) Volkanik kayaların propilitleşmesi ve propilitleşme zonlarında silisyumun göçü, ısıtılmış sularla altın, gümüş gibi metallerin çözünerek çoğunlukla genç fay ve kırıklarda yeniden çöktürülmesi.

### 3. MAGMALARIN DİFERANSİYASYONU ESNASINDA ALTININ DAVRANIŞI

Orojenik sistemlerin postorojenik, senorojenik evresiyle jeosenklinallerin ilk dönemlerinde gelişen olayları anlamada magma petrolojisinin incelenmesi oldukça önemli sonuçlar verir. Dünyanın birçok yerinde mafik ekstrüzyonlar ve gabroidler yaygın gözlemlendiği şekliyle volkanoplütonik seriler oluşturmaktadır. Bu kayalarla birlikte orojenik kuşaklarda gelişen ve asitik bileşimli olan ekstrüzyonlar ile sübvulkanik granitoid entrüzyonları yapılarında değişen yoğunlukta kristalleşmenin farklı evrelerini temsil eden pek çok mineral içerir. İzlenen mineral topluluklarının kristalleşme zamanı ya otometasomatizma ya da magma kristalleşmesinin postmagmatik veya senmagmatik evresine denk düşer. Örneğin olivin, piroksen, plajiyoklaz, almandin ve piroper erken magmatik evrede kristalleşen mineralleri oluştururlar. Her bir evrimleşme evresinin karakteristik minerallerinin metal içeriklerinin incelenmesi, oluşum ortamlarının karakteristik koşullarının saptanması orojenik kuşaklarda altının davranışı konusundaki bilgilerimize tamamlayıcı nitelikte katkıda bulunur.

Bir çok bölgede bazalt ve granitoid magmalara yönelik sürdürülen çalışmalar iki ayrı volkanojenik evrim periyodu yanısıra, geç Paleozoik ile Meso-Senozoik yaşlı yüksek altın içerikli sübenürsif kayaların varlığını ortaya koyar. Bunlardan anlaşıldığı kadarıyla mafikten asit karaktere doğru değişim gösteren magma differansiyasyonu esnasında altın, 1-2 hatta 2,5 kat zenginleşmektedir. Jeosenklinallerin özellikle Kambriyen yaşlı gabro-diyabaz, diorit ve porfirik kütlelerinde altın içeriği volkanik süreçte gelişim gösteren kayalardan 1,2 ile 1,4 defa daha az değerler gösterir. Bu kayalar içinde altın konsantrasyon katsayısını ifade eden  $K_a$ , çoğunlukla 0,9-0,6 aralığında kalır. Bulgular, altının bazalt bileşimli magmaların differansiyasyonu esnasında magmatojenik sıvılarca taşınmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Diğer yandan bazı spesifik bölgelerde entrüzyonların altın cevherleşmesi aynı zamanda yapısal ve litolojik faktörlerin

## madencilik

saptanmasını da kolaylaştırır. Genel olarak orojenik kuşaklarda yer alan bazaltik ve granitoidlerde altın dağılımının incelenmesi bu kayalar n benzer parametrelere sahip olduğunu ortaya koyarsa da bu benzerlik esas olarak ilksel magmanın differansiyasyonu esnasında magmatojenik sıvılar tarafından altının mobil hale gelmesinin bir sonucudur. İçerdiği yaşlar dikkate alınmadan bazalt bileşimli kayaların ortalama altın içeriği Korobeynikov (1989) 'a göre  $x=1,8-3,9$  ppb arasındadır.

Kabuğu oluşturan basaltoid ve granitoid birliği kayaların ortalama metal içeriği mafik volkanikler için 3,6, gabrolarda 3,1, asitik volkaniklerde 2,8, granitoidler içinde 2,0 ppb değerleri gösterir. Ancak üretken plütonlar belirgin şekilde daha yüksek altın içeriğine sahiptir. Asit plütonlardan porfir tipi cevherleşmeler içerenlerde 10-15 ppm gibi oldukça yüksek altın miktarına rastlanılabilir. Örneğin Doğu Karadeniz'de geniş alanlar kaplayan ve porfiri bakır cevherleşmesi içeren granitoid birliği kayalarının ortalama altın içerikleri kısır olanlara göre daha fazladır ( $K_a=9-88$ ).

Çok evreli entrüzyonlarda her bir evreye ait kayalarda altın içeriği değişkenlik gösterir. Sovyetler Birliği'nde erken ve Orta Paleozoik ve Senozoik yaşları temsil eden granitoid birliği kayaları erken entrüsif evreden geç entrüsif evreye doğru gidildikçe altın içerikten bir azalma gösterirken, üst Paleozoik ve Mesozoik yaşlı birimler ters bir eğilim içindedir. Benzer şekilde gabro-diyabaz dayklarda ( $K_a=1,2-7,5$ ) ve gabrodiorit bileşimli stoklarda altın içeriğinin az da olsa yüksek olması, Paleozoik yaşlı orojenik kuşaklarda yer alan gabroid birliği kayaların karakteristik özellikleriyle ve magmatojen kayalarda genel altın davranışıyla uyumludur.

Magmatik kayalarda altının davranışının belirlenmesinde, birbiri ardınca sokulum yapan diyabaz dayklarının kimyasal bileşimlerinin saptanması önemli ip uçları verir. Birçok sahada yapılan gözlemler 4 ile 6 defa sokulum yapan daykların varlığını ortaya koymuştur. Bu şekilde birden fazla evreli diyabazların altın dağılımının incelenmesi, ilk jenerasyonu oluş-

turan kayaların ortalama metal içeriğinin 1,9-5,3 ppb arasında olduğunu ancak son evreye doğru gidildikçe altın içeriğinin 2,8 ppb'den 5,1-9,8 ppb ( $K_a=1,2-7,5$ ) olacak şekilde dereceli bir artışın varlığını ortaya koymuştur. Bu tür çol<sup>1</sup> sayıdaki çalışma bazalt bileşimli magmaların differansiyasyonu ile 1,2 ile 7,5 defa daha fazla bir altın zenginleşmesinin mümkün olduğunu, gelişmenin magmanın sülfürizasyonu ya da sı içeriğindeki artışla ilgili olduğunu ortaya koyar (Korobeynikov, 1989).

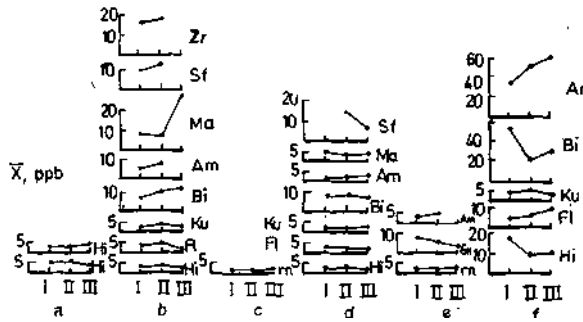
Birden fazla evreli granitoid grubu kayalarda ilk fazdan son faza doğru altın konsantrasyonu, zayıfda olsa, bir azalma eğilimi içindedir. Örneğin Sovyetler Birliği'nde üç fazlı üst Paleozoik yaşlı granitoidlerin  $K_a$  değeri I. fazda 1,43,11 ve III. fazda ise sırasıyla 1,38 ve 0,6 değerlerinde olup belirgin bir azalmayı yansıtır. Kazakistan'da alt Paleozoik granitoid birliği kayalar ve mineralleri içinde de benzer sonuçlara ulaşılmış, I. fazdan II ve III faza doğru gidildikçe (0,81;0,62 ve 0,71)  $K_a$  değerleri bir azalma göstermiştir. Benzer şekilde, Hersiniyen kıvrım kuşakları ile ilgili olan granitoid grubu kayalarında ilk fazdan son faza doğru  $K_a$  değerlerinde belirgin bir azalma tespit edilmiştir ( 1,29;1,38;0,93 ve 1,29). Altın konsantrasyonunda azalma eğilimi Kamçatka Senozoik granitoid grubu kayaları nda da gözlenmiş  $K_a$  değeri ilk fazda 8,4 son fazda ise 4,75 olmuştur. Diğer yandan anılan birlikler içinde nispeten yüksek (3,3-9,7 ppb) ya da düşük (1,3-2,9 ppb) altın içeren ve farklı fazları temsil eden minerallerde saptanmıştır. Bütün entrüsifler içinde en değişken  $K_a$  değerleri sfen, zirkon ve magnetit içinde tespit edilmiştir. Kayalar ve minerallerdeki değişkenlik esas olarak magmaların farklı kimyasal bileşim altında differansiyasyonu ve katılaşmasıyla ilişkilidir. Varılan sonuçlar değerlendirildiğinde, birden çok fazlı granitoidlerin yaşlarına göre ortalama altın içerikleri, şu şekilde bir değişkenlik göstermektedir. Alt Paleozoik; 3,0-18,2 ppb, Mesozoik 3,0-7,5 ppb, senozoik, 9,7-58,9 ppb, üst Paleozoik; 1,9-3,7 ppb, Orta Paleozoik; 1,3-1,7 ppb (Şekil 2).

Magmatojen altın yataklarıyla ilgili çalışmaların odaklaştığı başlıca nokta altının, krist-

## madencilik

Kalleşen bir entrüsiften kaynaklanan sular içinde zenginleştiği ve yapısal etmenlere bağlı olarak çöktüğü şeklindedir. Ancak magmatik eriyikler ve sıvı çözeltiler içinde çözünmüş olan metal miktarının ne olduğu hala bir problem oluşturmaya devam etmektedir. İncelemeler, magmatik eriyiklerin nötr bileşimde olduğunu, ilksel kayaları kalkerli ve magnezyumlu olan skamlarda minerallerin sıvı kapanımlarının altın içerdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle sıvı enklüzyonlar oranını ( $K_p$ ) hesaplamak mümkündür. Diğer yandan gerek kontak metamorfik kayalarda gerekse pegmatitlerdeki mineral enklüzyonlarında, nispeten yüksek miktarlarda altının bulunması sıvılar içinde önemli oranda altının zenginleşebileceğini göstermesi yönüyle ilginçtir ( $K_p = 5-296$ ). Benzer şekilde otometasomatizmaya uğramış olan kayalardaki ikincil minerallerin yüksek altın içeriğine sahip olmaları granitoid entrüzyonlardan kaynaklanmış olan sıvı çözeltilerin önemli miktarda altın çözdürdüklerinin diğer bir işaretidir.

Bazik ve asitik magmaların kristalleşmesinde sıvı ve katı fazlar arasında altın oranı ( $K_p$ ) or-



Şekil 2. Gabroid ve granitoid entrüzyonların farklı fazlarında yer alan minerallerde ve kayalar içinde altının dağılımı

a) Gabroid entrüzyonlar (Gablo, gabrodüyabaz, gabrodiyorit, gabronorit), b) Altay-Sayan ve Kazakistan Alt Paleozoyik granitoid grubu (I. faz gabro-diorit, monzonit; II. faz granidiorit, plajiogranit; III. faz granit aplit, pegmatit; c) Kazakistan orta Paleozoyik granitoid grubu. (I. faz diorit, tonalit; II. faz granodiorit; III. faz granit, granosiyenit, alaskit); d) Kazakistan üst Paleozoyik granitoid grubu (II. faz diorit, granodiorit, plajiogranit; III. faz granit, alaskit, aplit granit, granit porfir); e) Yakutistan ve Çukotka Mesozoyik granitoid grubu (I. faz siyenitdiorit, II. faz granidiorit, III. faz granit); f) Kamçatka Senozoyik granitoid grubu. (I. faz gabro-diorit, II. faz granodiorit III. faz granit); I, II, III; entrüzyon fazları, Zr-Zirkon, Sf-sfen, Ma-Magnetit, Am-amfibol, Bi-Biotit, Ku-kuvars, Fl-feldspat, Hi-hipersten (Korobeynikov, 1989).

talama yönüyle sırasıyla 25:1 ve 5,5:1 "dir. Bazaltik bileşimli magmalarda bu oran kristalleşmenin ilk evresinde 1,3:1, son evresinde 2,5:1 şeklindedir. Buna karşın cevher taşıyıcı granitoid magmalarda sıvı ve katı fazlar arasındaki altın oranı daha yüksek olup kristalleşmenin başlangıcında ( $K_p$ ) 2:1, son evresinde 5,5:1'dir. Üretken granitoid entrüzyonlarda ise bu oran 53-296:1 şeklinde oldukça büyük bir değer göstermektedir (Korobeynikov, 1989).

Magma kristalleşmesinin son evresinde gelişen sıvı çözeltiler, altın yataklarının oluşumunu açıklamak için kullanılan modelde, kabuğun üst seviyelerine metal taşıma görevi üstlenirler. Ancak bu görevi, yalnızca magmatik orijinli sıvılar değil, aynı zamanda meteorik kökenli sıvılar da üstlenmektedir ki bu tür modelde, altın yataklarının oluşumu jeotermal bir sistem içinde ele alınır.

## 4. PEGMATİTLERDE ALTININ DAVRANIŞI

Pegmatit minerallerin içermiş olduğu sıvı kapanımlarının incelenmesi, bunların sodyum klorür bileşiminde olduğunu bazı koşullar altında  $1,2-9,6 \times 10^{-6}$  mol/litre oranında altın içerdiklerini ortaya koymuştur. Ancak en yüksek altın değerlerine çoğunlukla granitoid entrüzyonlarla ilişkili olan pegmatitlerde rastlanılır. Klorca zengin olan bazı pegmatitlerde altın içeriğinde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Genel anlamda pegmatitlerde metal yığılması geç hidrotermal-metasomatik işlemlerle ilişkilidir. Altın yatakları, kökenlerine bakılmaksızın pegmatitlerin gelişiminin çoğunlukla son evresinde ortaya çıkmaktadır.

Flüor içeren pegmatitler, üretken plutonlardan kökenlenen klor içerikli pegmatitlerden daha az altın içeriğine sahiptir. Altınca kısır olan granitik bileşimli magmalardan itibaren gelişen pegmatitlerin altın içeriği doğal olarak düşük olacaktır. Diğer yandan altının taşınmasına neden olan sıvılar ile uçucuların bulunmadığı ortamlarda pegmatitler yüksek altın içeriğine sahip olabilir. Kolayca anlaşılabilir gibi yüksek sıcaklığa sahip sıvıların metal içeriği doğrudan magma büyüklüğünün bir fonksiyonu olacaktır.

## madencilik

### 5. METAMORFİZMA ESNASINDA ALTININ DAVRANIŞI

Gerek magnezyumlu gerekse kalsiyumlu kayaçların metamorfizmasıyla oluşan skarn mineralleri içinde nispeten yüksek oranda altına rastlanılır. Üretken granitoid entrüzyonların neden olduğu skarnlarda yer alan mineraller daha yüksek altın değerleri içerirler. Silisleşme, listfenitleşme ve sülfürleşme gibi hidrotermal alterasyonların da izlendiği alanlar en yüksek metal konsantrasyonu vermektedir.

Dolomitlerin magmatik replasmanı ile meydana gelen magnezyumlu skarnlarda spineller, 400-900 ppb altın içeriği ile çoğu zaman ana mineral özelliği gösterirler. Genel olarak kalker orjinli skarnların altın içeriği 5,2 ile 17,7 ppb arasında kalır. Granat, diopsid, skapolit, ve züvyahit ve vallostanit gibi skarn minerallerinin altın içeriği çoğunlukla 3,7 ile 18,9 ppb arasında kalacak şekilde benzer bir davranış sergiler. Sovyetler Birliği'nde çeşitli bölgelerde yer alan skarnlarda yapılan incelemeler altın içeriği yönüyle granatların iki gruba ayrıldığını göstermiştir: (1) ortalama altın içeriği 7,9 ppb olanlar, (2) 160 ppb gibi oldukça yüksek oranda altın içerenler. Son gruba dahil olanlardan altın konsantrasyon katsayısı çoğunlukla 2,1-3,6 değerleri arasında nadiren de 57 gibi büyük bir değere ulaşmaktadır. Diğer metasomatik minerallerde belirlenmiş olan ortalama altın içerikleri ppb olarak magnetitde 150-600, epidotta 3,8-11,7, kloritte 7-16,2, tremolit-aktinolitte 8-13,7, flogopitte 5,8, serpantinde 5,0 olup rekristalizasyon ile sülfürizasyonun etkili olduğu yerlerde minerallerin metal içeriği belirgin şekilde yükselmiştir.

Genel olarak, kontak metamorfik kayaçlarda altın dağılımı tekdüze bir karakter göstermez. Kayaçların altın potansiyelini belirleyen en iyi endikatör skarn minerallerinin yüksek altın içeriğidir. Söz konusu minerallerin standart sapma ve varyans gibi istatistiksel parametreleri de kısır olanlara göre belirgin farklılıklar sunar. Süregelen çalışmalar skarnlarda altınla birlikte izlenen başlıca elementlerin Cu, Pb, Zn, Bi, As, Sb, W, Ba ve Ga'dan oluştuğunu ortaya koyar.

Altınlı kuvars damarları ile diğer tür altın yataklarına yaklaşıldıkça yankay<sup>ç</sup> içindeki  $K_2O/Na_2O$  oranı çoğunlukla artış göstermektedir. Polimetalik yataklarda da benzer durum gözlenmiş mineralizasyon merkezine doğru  $K_2C$  miktarı yanı sıra  $CO_2$  oranında bir artışın meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum altınlı kuvars damarları için önemli bir belirteçtir ancak skarn tipi yataklarda bu işlemin tersi doğrudur. Diğer yandan altın yataklarının pefçoğunda cevhere yaklaşıldıkça  $SiO_2$  ( $CO_2+H_2O+S$ ) oranı azalmaktadır ki bu olay silikatların karbonatlaşması ve sülfürleşmesi esnasında serbest kalan silisin kuvars oluşturmak üzere yankayacın çatlakları içinde göç etmesinin bir sonucudur.

Kontak metamorfik kayaçlarda altın konsantrasyonu sülfür ve klorun davranışıyla doğrudan ilişkilidir. Kimyasal çalışmalar, sıcaklığı yüksek olan sıvıların ( $630-450^\circ C$ ) klorca daha zengin olduğunu göstermiştir. Klorla birlikte, solüsyonlar  $550-300^\circ$  sıcaklıklardaki sülfür konsantrasyonu artışı postskarn metasomatieme ve hidrotermal damarların oluşmasına engel olur. Bu koşullar altında kalkofil elementler dışında altın miktarı en yüksek değerlere ulaşır. Mevcut altının başlıca kaynağı entrüsyon yapan magmatik kütledir. Metal cevherleşmesi,  $380-130^\circ C$  sıcaklıklar aralığında solüsyonların sülfür içeriğinin büyük miktarda artmasının bir fonksiyonudur.

Metosomatizme uğramış cevher kütleleri etrafında Ba, Hg, Sb, Ag, Cu, Pb, Zn, Bi, As, W, Au, V, Ti, Ni, Co, Cr, Mo ve Be gibi elementlerin negatif karakterli anomalileri belirginleşir. Negatif anomaliler, kalsik ve sodik bileşimli kayaçların bulunduğu alanlarda nadiren de anakayaçta şiddetli bir karbonatlaşmanın geliştiği zonlarda ortaya çıkmaktadır.

Çoğunlukla Paleozoik yaşlı büyük metamorfik masiflerde metamorfik kayaları kesen kuvars damarlarının altın konsantrasyon katsayısı yüksek değerler gösterebilir. Altınlı kuvars damarlarının oluşumu esas olarak bölgesel metamorfizmayla ilişkili hidrotermal bir model içinde düşünülür. Ancak oluşan cevherleşme küçüktür ve çoğunlukla ikincil altın yatakları için

## madencilik

önemlidir. Oluşumlarından birinci derecede postanateksi hidrotermal çözeltiler sorumludur. Batı Anadolu'da geniş alanlar kaplayan Menderes Masifi metamorfik kayalar özellikle şistleri içine uyumlu ya da uyumsuz yerleşen kuvars damarları benzer bir mekanizmanın ürünleridir. İzmir-Ödemiş ve Tire civarındaki kuvars damarlarında sürdürülen çalışmalar hidrotermal çözeltilerin, Au, dışında, As, P, F, Ti ve Ka, Na gibi elementler içerdiğini ortaya koyar. Au içeriği çoğunlukla 100 ppb civarındadır ve değişmez bir şekildedir. Arsenopirit içeriği ile yakından ilişkilidir. İri rutil oluşumlarına imkan veren Ti içeriği ile Au içeriği arasındaki ilişki belirgin değildir. Bu kayaçların altın içeriği nadiren 2-3 ppm değerlerine kadar yükselir. Altın, kuvars damarlarını oluşturan çözeltiler vasıtasıyla yan kayaçlardan mobil hale geçmiş, yapısal faktörlere bağlı olarak uygun yerlerde tekrar çökelmiştir. Gerek Au içerikleri, gerekse de hacim ve yaygınlıkları dikkate alındığında bugünkü koşullarda cevherleşmenin ekonomik nitelikte bulunduğu söylenemez.

### 6. JEOTERMAL SİSTEMLER İÇİNDE ALTININ DAVRANIŞI

Jeotermal sistemlerde altın yatağını oluşturan çözeltiler büyük çoğunlukla bir magma ocağı tarafından ısıtılmış olan meteorik sulardır ancak bu çözeltilere kalıntı magma eriyiklerinden beslenen suların ilavesi de mümkündür. Sahip oldukları kimyasal bileşim yanında, ısınma sonucu aktif hale gelmiş olan sular içinde dolaştıkları yan kayaçlardan çözdükleri metalleri, çoğunluğu yüzeye yakın alanlarda yüksek geçirgenliğe sahip volkanik yan kayaçlar içinde bırakarak altın yataklarının oluşumuna neden olurlar. Yan kayaç içerisinde silişleşme, arjilitleşme piropilitleşme gibi alterasyonlar bu tip cevherleşmeler için önemli bir belirteçdir (International Mining 1988, Kırkoğlu 1990).

Jeotermal sistemler esas olarak epitermal sistemler olup sülfat tuzları, selenürler, tellürler ve antimuan sülfürlerden oluşan kompleks bir mineralojik yapı içerirler. Bazı yataklarda altına çok az oranda, Pb, Zn ve Cu eşlik eder. Tektonik yönden aktif ya da magmatik süreçler içe-

ren jeolojik yapılarda gelişen jeotermal sistemlerin belirgin ortamları ada yayları, derin sedimanter tabanlar, tektonik kuşaklar ile sıkışma zonları veya okyanus tabanı yayılma bölgeleridir. Yatağın şekli altın çözeltilerin yerleşme derinliğine bağlı değişim gösterir. Yüzye ya da yüzeyin hemen altında hızlı soğuma nedeniyle patlama breşi ve fümerollere bağlı stockwork tipi cevherleşme, yüzeye yakın sığ derinliklerde çoğunlukla damar tipi ve remplase cevherleşme, derinlerde ise damar tipi cevherleşmeler oluşmaktadır. Jeotermal sistemlerde altın aynı süreçler içinde gelişim gösteren diğer bazı minerallerin yapılarında değişen oranlarda yer alabilir. Cevherleşmede 300°C ya da daha düşük sıcaklıklarda çözeltilerin sülfür konsantrasyonu atışı ve ısınmış olan jeotermal çözeltilerin hareket ettiği geçirgen kayacın türü ile ilksel metal içeriği başlıca önemli faktörlerdir. Büyük çoğunlukla geçirgen kayaç kompleksi çeşitli derecede metamorfizma geçirmiş ve deformasyona uğramıştır.

### 7. METASOMATİK KAY AÇLARDA ALTIN KONSANTRASYONUNUN NEDENLERİ

Üretken granitoid entrüzyonlarından kaynaklanan diorit-lamprofir türü dayklarda belirgin şekilde yüksek altın içeriği tespit edilmiştir. Üretken ve kısır entrüzyonlarda ana mineraller ile tali mineraller ortalama altın içeriği yönüyle farklı bir ayrıcalık göstermezler ancak üretken entrüzyonlarda yer alan mineraller içinde altın çok düzensiz bir dağılım sergilerken kısır olanlarda daha az düzensiz bir dağılım gözlenir. Üretken entrüzyonlarda en önemli kantitatif endikatörler; Cu, Pb, Zn, Bi, Te, Ag, As, Sb, Ba ve Ga gibi elementler, kontak metamorfizma ve otometasomatizmaya gelişmiş mineraller, hidrotermal damarlarda yer alan mineraller ve altın dağılımını yansıtan temel istatistiksel parametrelerdir. Genel olarak en yüksek altın içeriği postskarn metasomatizmaya maruz kalmış olan kayaçlarda ve minerallerde tespit edilmiştir.

Postskarn metasomatizma esnasında altının davranışını denetleyen iki farklı süreçten sö-



zedilebilir. Birincisi özellikle abisal zonda, alkali otometasomatizma süresince, metallerin % 20-25 gibi önemli bir bölümünün ana granitoid kütlelerinden taşınması ve yeniden çökelişi ikincisi, yerel metasomatizma süresince, metallerin, sıcak sular tarafından kırık ve fay gibi süreksizlikler içinde taşınmasıdır. Her iki süreçte altının mobil hale gelmesinde mineraleştirici çözeltilerin sıcaklıkları ve kimyasal bileşimleri önemli bir rol üstlenir. Son yıllarda sıvı enklüzyonların kimsiyal bileşimlerinden giderek çözeltilerin altın içeriği ile ilgili problemlerin çözümlüne çalışılmaktadır. Metasomatizmayla gelişmiş olan kuvars, ortoklaz, albit, muskovit ve biotit gibi minerallerin içermiş olduğu sıvı enklüzyonlar esas olarak potasik-sodik-klorür-karbondiyoksit bileşimlidir ve 520-260°C'lik bir homojenleşme sıcaklığına sahiptir. Benzer çalışmalar altın içeren enklüzyonlarda da yapılmış, kuvars ve albit içindeki sıvı enklüzyonların klorür-sodik-kalsiyum bileşiminde olduğu ve 480-270°C'lik bir homojenleşme sıcaklığına sahip oldukları tespit edilmiştir. Bu sıvı kapanımların Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> oranı 2:1'den 3:1'e, Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> oranı 1:1'den 2:1'e Cl<sup>-</sup>/F<sup>-</sup> 60:1 ve Cl<sup>-</sup>:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>:SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> oranı ise 1:1:0'dan 4:5:1 olacak şekilde değişkenlik gösterir. Ancak tersi bir şekilde metasomatizmayla gelişmiş ve altının tespit edilmiş olduğu bazı kayalarda, albit sıvı enklüzyonları esas olarak yüksek florür içeriklidir (Cl/F oranı 1:1) ve enklüzyonların diğer anyon ve katyonların oranı Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>, 3:1 - 4,4:1, Cl<sup>-</sup>:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>:SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 2:2:4:1-13:30:1'dir. Diğer yandan bazı listvenitlerde, serizit ve kuvars içinde yer alan sıvı enklüzyonların klorür 360 ile 180°C'lik bir homojenleşme sıcaklıklarına sahip oldukları gözlenmiştir (Korobeynikov 1989; Henyel, 1973).

Sonuçlardan kolaylıkla anlaşılacağı gibi çözeltilerin klor içeriği ile altın içeriği arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Henyel (1973) yüksek sıcaklıklarda (480 - 510°C) klor içeren solüsyonlar içinde altın eriyebilirliğinin artacağını ileri sürer. Gerçekte, yüksek sıcaklıklarda (460°C'nin üstünde) metasomatizma süresince altının anakayaçtan çözünerek mobil hale geçmesi mümkündür.

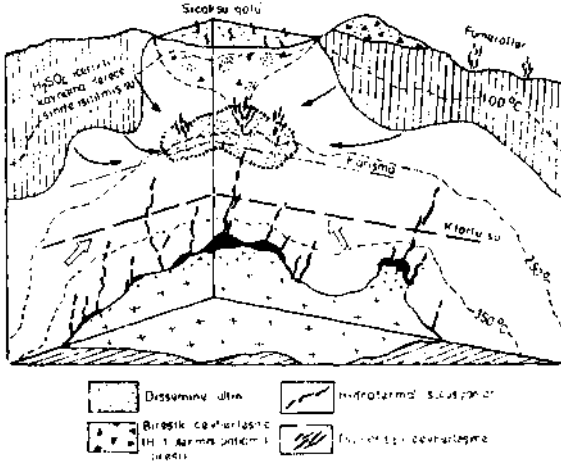
Böylece altın yataklarının oluşumundan aktif hale gelmiş olan meteorik sular ve postmagmatik solüsyonlarla birlikte, granitoid entrüzyonların otometasomatizmasının da sorumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Sokulum yapan bir entrusifin çevresinde demir, altın ve kalkopirit cevherleşmesinin geometrik şekli, entrusifin tepe noktasında çözeltilerin hareketine imkan sağlayan çatlak ve faylarca büyük ölçüde denetlenir. Magmatik bir kütle alkali karakterli otometasomatizmaya ya da yerel ölçekli metasomatizmaya uğradığında, metasomatik kütlelerin alt zonlarında Si, Fe, Cu, Pb, Zn, Bi, Ag, Ni ve Co elementlerinin negatif karakterli, buna karşın üst zonlarda ise pozitif karakterli anomalileri gelişmektedir. Bu koşullarda metasomatik sütunun alt zonlarında potasik ve sodik mineraller meydana gelirken üst zonlarda çoğunlukla greyzenler, beresitler, listvenitler, arjilitler ve cevherleşmeler gelişmektedir. Daha açık bir ifadeyle sütunun alt zonlarından metasomatizma ile birlikte Si, Fe, Au ve kalkofil elementler mobil hale geçerek taşınmışlardır. Bu sistem içinde oluşmuş olan magmatojenik yataklar metasomatizmayla eş zamanlıdır ve çoğunlukla dissimine, sicim ve damar tipi cevherleşmeler gösterir.

Metaller, magmaların kristallenme sürecinde ortaya çıkan postmagmatik çözeltilerce cevher oluşum zonlarına taşınmaktadır. Bu işlem, entrüzyonların abisal zonlarında kayacın otometasomatizmasıyla aynı zamana denk düşer. Magma differansiyasyonu sürecinde gelişen olası metasomatizma esnasında magmatojen sıvılar altınca doygun hale gelerek postmagmatik karakterli magmatojen altın yataklarının oluşmasını sağlar.

Ultrabazik kayaların hidrotermal etkilerle listvenitleştiği alanlar belirgin yüksek altın içerikleriyle karakteristiktir. Listvenitleşmeye bağlı altın zenginleşmesine Rusya'da Ural Dağları serpantinlerinin bindirme kuşakları boyunca yaygın sekide rastlanılır. Bu kayalar Ural Dağlarının Au ve Pt potansiyelinin önemli bölümünün kaynak kayacını teşkil eder. Türkiye'de ise Erzurum ilinin Narman ilçesinin

## madencilik



Şekil 3. Epitermal cevherleşmelerde, jeotermal sistemlerin şematik kesiti.

hemen birkaç km kuzeyinde doğu-batı doğrultusunda yaklaşık 25 km uzanan ultrabazik kökenli Karadağ masifinde yer alan listvenitler bu konuda bilinen en iyi örnekleri oluşturur. Masif Paleotetisin kuzey kolunun kabuğunu oluşturan ofiyolit dizisinden meydana gelmektedir. En altta harzburjit ve bu kayacın otometamorfizması sonucu meydana gelmiş olan serpantinler yer alır. Serpantinlerin üzerinde bindirme hattı boyunca sürüklenmiş olan büyük kütle, yine aynı bindirme hattının meydana getirdiği kırık kuşağı boyunca çıkan hidrotermal çözeltilerin metasomatizmasıyla listvenitleşmişlerdir. Hidrotermal ayrışma sonucu başlangıçta kalsifiye olarak dolomitleşen serpantinler sonradan silisifiye olmuştur. Mevcut bindirme kuşağı boyunca gelişen çözeltiler Au, Pt, Ni, WO<sub>3</sub>, As ile eser oranda Sb, Bi, Nb gibi element içeriklidir ve listvenitleşme sonucunda oluşan cevherleşme polimetalik bir özellik gösterir. Altın içeriği çoğunlukla 500 ppb altında olmakla birlikte nadiren 25000 ppb değerlerine kadar yükselir. Yaygınca gözlenen arsenopirit altının büyük bir bölümünü yapısında bulduran ana mineral konumundadır.

Ultrabazik kayalarla görülen altın cevherleşmesi çoğu zaman magma differansiyas-

yonu sonucunda gelişen hidrotermal çözeltilerin kırık sistemlere yerleşimi ile ilişkilidir. Bursa-Orhaneli (Topuk-Göynükbelen) yöresinde, Üst Kretase yaşlı ultrabazik kayalardan alınan ayrışma oranı çok düşük örneklerin altın içeriği, ultrabazik kayalardan beklenen ölçülerde düşük değerler verir. Ancak bu kayaları kesen Paleosen granitoid kütlelerinin dokanaklarında ve dokanağa yakın alanlarda ayrılmış kaya örneklerinde 100-3000 ppb değerleri arasında altın saptanmıştır. Altın derişiminin başlıca nedeni fay hatları boyunca yerleşen postmagmatik çözeltilerin ultrabaziklerle olan reaksiyonel ilişkisidir. Çalışmalar hidrotermal çözeltiler içinde Au ile birlikte, Ni, Co, V, Mn, Cu ve Zn'nun varlığını ortaya koyar. Altın içeriği ile bakır cevherleşmesi arasında belirgin bir ilişki olup özellikle faylanmanın şiddetli olduğu yerlerde gelişen pirit, kalkopirit ve bunlardan türeyen malakit ve azurit gibi minerallerin altın içeriği 1-2 ppm mertebesine ulaşır.

## 8. SONUÇLAR

Orojenik kuşaklarda altın yataklarının oluşması üç farklı işlevin sonucunda gerçekleşmektedir.

—Bir magma kaynağı tarafından ısıtılmış olan ve sahip olduğu ısı ve kimyasal bileşim nedeniyle yüksek çözme yeteneği kazanmış meteorik kökenli çözeltilerin içerdikleri metalleri yüksek geçirgenliğe sahip kayalar içinde bırakmaları,

—Özellikle granitoid bileşimli kayaların entrüzyonu sürecinde ortaya çıkmış post-magmatik çözeltilerin uygun jeolojik yapılarda içerdikleri metalleri bırakmaları,

—Granitoid entrüzyonların metasomatizmasıyla altının hareketlenmesi ve yeniden çökmesidir.

En yüksek altın içeriğine sahip yataklar çoğunlukla postkarn metasomatizmayla ilgili olan yataklardır. Ancak jeotermal sistemler içindeki yataklar daha büyük rezervler içerirler ve önemli bir kısmı yüzeye yakın alanlarda bulunmaktadır. Bu nedenle son yıllarda bu yataklara olan

## madencilik

ilgi oldukça artmıştır. Olası cevherleşmelerin tespitinde silisleşme, listvenitleşme, sülfürleşme, piropilitleşme gibi alternasyonların varlığı önemli bir ipucudur.

Bazalt bileşimli magmaların differansiasyonu sonucunda oluşan asit belişimli kayalar içinde altının 1,2 ile 7,5 defa daha fazla zenginleşmesi esas olarak magmaların su içeriğindeki artışla ilgilidir. Doğal olarak üretken entrüzyonların altın cevherleşmesi oluşturma şansı daha fazladır. Bu durum en iyi şekilde pegmatitlerde görülmekte, üretken granitoid entrüzyonlarla ilişkili olanlarda oldukça yüksek altın değerlerine rastlanılmaktadır. Ancak altın, en yüksek değerlerine magmatojen sıvılar içinde ulaşmaktadır. Yüksek sıcaklıklar içeren bu çözeltilerin klor içeriği ile altın miktarı arasında bir ilişki bulunmakta, yüksek klor mevcudiyeti altının eriyebilirliğini artırma yönünde etkili olmaktadır. Altın yataklarının oluşumunu açıklamada kullanılan modellerde çeşitli metaller içeren sıcak çözeltilerin kökenleri magmalara ya da meteorik sulara bağlanmaktaysa da , çoğu zaman cevherleşmeden hangisinin sorumlu olduğunu kesin sınırlarla saptamak güçtür.

### KAYNAKLAR

- AYKOL, A., GÜLTEKİN, A. H., 1992; Plaser Yatakları", I.T.Ü. Vakfı Yayınları, İstanbul
- BOYLE, R.W., 1979, The Geochemistry of gold and its deposits, Geol. Survey of Canada, Bulletin 280, 584 p.
- GÜMÜŞ, A., 1970, Türkiye Metalojeni , M.T.A. Enstitüsü Yayınları, Ankara, No.44, s. 30.
- GÜLTEKİN, A.H., 1991, Dünya Alüvyal Altın Plaserleri, I.T.Ü Dergisi, Cilt 49, Sayı 2.
- HENLEY, R., 1973, "Solubility of gold in hydrothermal chloride solutions", Chem. Geol, vol. 11, No.2, pp 73-87.
- INTERNATIONAL MINING, February 1988, "Epitermal Gold", A Basic guide to the pacific epitermal arc;Where the gold is to be found and Where it came from, pp 7-22.
- KARAMANDERESİ I.H., 1989 "Epitermal Altın Yatakları ve Jeotermal Sistemlerin Göçü", 43. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara.
- KIRIKOĞLU, M.S., 1990; "Epitermal Altın Yataklarının Oluşumu ve Özellikleri", Madencilik Dergisi, Cilt XXIX Sayı 1, Sayfa 41-50.
- KOROBAYNIKOV, A.F., February 1989 ; "Behavior of gold in magmatic and metasomatic processes", International Geology Review, volume 31, pp 171-175.
- PYKE, D.R., 1976; "On the relationship of gold mineralization and ultramafic volcanic rocks in the Timmins area, northeastern Ontario" Can. Inst. Min. Metal., Bulletin V. 69, No.773, pp. 79-87.
- LINDGREN, W., 1993, "Mineral Deposits" Mc Graw-Hill book company, New York and London, 930 p.