

AVNİK (BİNGÖL) METAMORFİK MANYETİT OLUŞUKLARININ JEOKİMYASI, JEOİSTATİSTİKSEL İNCELENMESİ VE KÖKENLERİNİN İRDELENMESİ

Geochemistry and geostatistical investigation of the magnetites from metamorphic deposits of Avnik / Bingöl and interpretation of their genesis

HÜSEYİN ÇELEBİ Fırat Üniversitesi, Müh. Fak., Jeoloji Müh. Bölümü, ELAZIĞ

PZ: Avnik'te yer alan metamorfik manyetit oluşuklarının incelendiği bu araştırmada, özellikle demir grubu iz element içeriklerinden, istatistiksel dağılımlarından ve ilişkilerinden yararlanılarak yatağın kökeninin tartışılması amaçlanmaktadır.

Jeokimyasal inceleme sonuçları Sn'in 33, Fe'in 13, Pb'nin 10, V ve Mo'nin 6, Cr ve Ni'in de 2 defa Clarke değerlerine göre zenginleştiklerini, buna karşın Al'in 48, Cu'm 6, Mg'un 4, Ti'm 3 ve Mn'm da 2 defa seyrediklerini göstermiştir. Burada özellikle Cr ve Ni'in zenginleşmeleri magmatik intruziv oluşum tezini desteklemektedir.

Elementlerin istatistiksel dağılımlarında, Cr, Mo ve V dışında, tüm elementlerde logaritmik normal dağılım gözlenmiştir. Bu sonuç da magmatik kökeni destekliyen önemli bir ipucu sayılmaktadır.

Korelasyon ve regresyon analizleri Co-Zn, Pb-Zn, Cr-(Ni+V) ve Mo-Mo/Sn ile Mg-Mg/Co çiftleri arasında belirgin pozitif korelasyonlar vermektedir. Bu ilişkilerde magmatik bir ayrışma da gözlenmektedir. Çıkan bu sonuçlar doğrultusunda Avnik apatitli manyetit yatağı intruziv magmatik bir yatak olarak tanımlanmıştır.

ABSTRACT: This study investigates concentrations of Fe-group trace elements, their statistical distributions and relation in order to obtain new data which are useful in interpreting the genesis of the deposits.

The geochemical investigations show that the Sn 33, Fe 13, Pb 10, V and Mo 6, Cr and Ni 2 times enriched in relation to their Clarke values. In contrast to those, elements Al 48, Cu 6, Mg 4, Ti 3 and Mn 2 times impoverished. Especially the enrichment of Cr and Ni supports intrusive-magmatic thesis on the ore genesis.

All the investigated elements, except Cr, Mo and V show lognormal distributions. These can be considered as important indications to a intrusive-magmatic origin.

The correlation and regression analysis show significant positive correlations between Co-Zn, Pb-Zn, Cr-(Ni+V), Mo-Mo/Sn and Mg-Mg/Co. Those relations are to be seen only in magmatic differentiations. These results indicate that the apatite bearing-magnetite ore deposit of Avnik as intrusive-magmatic ore deposit.

GİRİŞ

Demir cevherlerinin aramasında köken, inceleme çalışmalarının kapsamını belirler. Ona göre jeokimyasal çalışmaların kapsamında demirin yanında Na, K, S, P, Cu, Pb, Zn, Ni, Cr, As ve V da tayin edilirler. Zira demir minerallerinin kristal kafesine kökensel tipine göre Fe³⁺ yerine Al³⁺ ve p³⁺ (götite), Fe²⁺ yerine Mn²⁺ (siderite) ve Ti²⁺ (leptoklorite) geçebilmektedir (Bottke, 1981, Hegemann ve Albrecht, 1954). Demir cevherinin kökenine göre değişen bu elementlerin miktarı Herdeki işlemler için belli sınırların aşılması halinde zararlı görülmektedir. Örneğin Ti, Cr ve Ni en çok likit magmatik demir yataklarında bu-

lunmaktadır. Bunlardan Ti'nin % 6'yı, Cr₂O₃'ün % 1'i ve Ni'nin de % 0.5'i geçmemesi istenir. Bu nedenlerle demir cevherlerindeki yan ve iz elementler özellikle önemlidir.

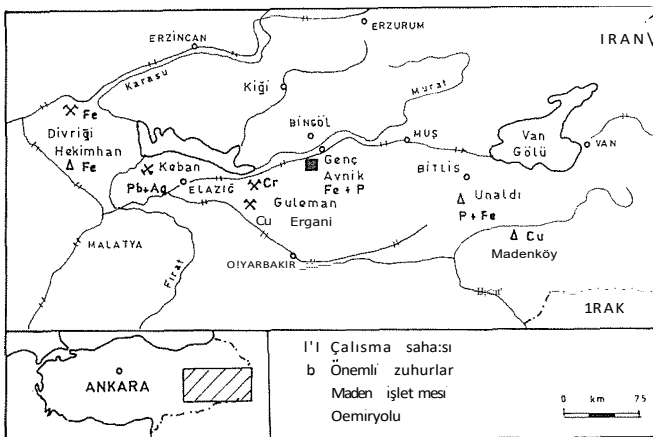
Demir yatakları doğada gerek köken ve gerekse yapısal olarak çok çeşitlidir. Jeokimyasal yaygınlığı nedeniyle her çeşit yatak tipine rastlanmaktadır. En yaygın ve önemli demir cevheri olan manyetit (% 72.4 Fe), ince dağılım halde hemen hemen her kayada, özellikle gabro, diyorit ve diyabaz gibi bazik derinlik kayalarında bulunmaktadır. Kübik kristal yapıya sahip, siyah renkli, mat, yaklaşık 5 g/cm³ yoğunluğunda ve en güçlü ferromanyetik özelliğe sahip bulunan manyetit, yapay olarak da elde edilmektedir.

Son 40 yılda Türkiye demir cevheri üretimi yaklaşık 10 kat (500 000 t'dan 5 mil. t'a) artmasına rağmen, demir ihtiyacı, üretimi aşarak 1968 yılından bu yana demir cevheri ithal edilmektedir (yakl. % 30 oranında). İşletilebilir demir cevheri rezervleri ise, Hasan Çelebi zuhurları dahil, yaklaşık 1.5 milyar t civarında bulunmaktadır (DPT, 1988).

Türkiye'deki demir yataklarının çoğu ekonomik çalışmamaktadır. Zira işletilen yatakların birçoğu düşük Fe tenörlüdür ve S, As, P gibi zararlı elementler içermektedir. Dolayısıyla işletilmeleri pahalı ve zenginleştirilmeleri sorunlu olmaktadır. Genel olarak önemli donatım ve yedek parça için gerekli döviz eksikliği veya bunları üreten sanayinin ülkede bulunmaması nedenleriyle maden yatakları yetersiz incelenmekte ve işletmeler küçük tutulmaktadır.

Türkiye demir madenciliği, yataklarının çokluğu, küçüklüğü ve demir içeriğinin düşüklüğü ile tanınmaktadır. Bilinen yaklaşık 1200 zehir değişik genetik tipleri temsil etmektedir. Bunların çoğu Anadolu'nun genç tektonik birliklerinde, örneğin Torid'lerde Malatya, Sivas, Kayseri ve Adana ile Anatolid'lerde, Çanakkale ve Balıkesir demir yatakları bölgesinde yer almaktadır.

Anadolu'nun tüm büyük tektonik birliklerinde çok sayıda kristalin masif de bulunmaktadır. Bunlardan demir yatakları bakımından Bitlis Masifi en ümitli görülmektedir. Batıda Bingöl'den, doğuda İran sınırına kadar uzanan Bitlis masifi, yaklaşık 300 km uzunluğunda ve 50 km genişliğinde bir metamorfik kuşak oluşturmaktadır. Bitlis Masifi'nin batısında yer alan Avnik apatitli demir oluşukları (Şekil 1), kesin ve muhtemel rezervleri ile 34 mil. t (% 48.2 Fe ve % 1.4 P₂O₅) Türkiye için önemli bir demir cevheri potansiyelini teşkil etmektedir. Elverişsiz örtü tabakası/cevher oranı (yakl. 4:1), yüksek P tenörü ve eksik altyapı nedenleriyle oluşuğun ekonomik işletilmesi şimdilik mümkün görülmemektedir.



Şekil 1 Yer Bulduru Haritası.
Figure 1 Location Map.

Magmatik intrüziv olarak tanımlanan orta büyüklükteki Avnik apatitli manyetit yatağında fizibilite etüdlerinin ve onları izleyecek değerlendirme çalışmalarının yapılabilmesi için gerekli temel incelemeler şimdiye kadarki araştırmalarla tamamlanmıştır. Benzer araştırma ve inceleme yöntemleri Bitlis Masifi'nin diğer zuhurlarında da uygulanabilecektir.

Bu çalışma, konunun önemi dikkate alınarak Avnik'te şimdiye kadar yapılmış bilimsel araştırmalara katkıda bulunmak, ileride yapılacak çalışmalara temel oluşturmak ve konuyu güncel tutmak amacıyla hazırlanmıştır. Bunun için Berlin Teknik Üniversitesi Maden Yatakları Enstitüsünde 1980-85 yılları arasında yapılan ve o zaman sadece daha bolca bulunan elementlerin jeokimyasal açıdan yorumlandığı manyetit analizlerinin iz element değerleri burada ayrıntılı olarak jeokimyasal yöntemlerle yorumlanmakta ve jeostatistiksel irdelenmektedir. Mo, Sn ve Pb gibi ender iz elementler ise, ilk defa bu çalışmada incelenmektedirler.

JEOLJİK VE MİNERALJİK GÖZLEMLER

Avnik bölgesinde Bitlis Masifi'nin metavolkanitleri, granitoyitleri, mikaşist ve mermerleri yaygın biçimde yüzeylerler. Kristalin kayaçların güneyinde Kretase-Eosen volkanitlerinden ve kireçtaşlarından meydana gelen Lice Formasyonu yer almaktadır. Kuzeyde ise, Tersiyer volkanitleri bulunmaktadır.

Metamorfik kayaçlar alt ve üst seri diye ikiye ayrılmaktadır (Erdoğan, 1982). Alt seri, metavolkanit, gnays ve granitoidlerden, üst seri ise, mikaşist, kuvarsit ve mermerlerden oluşmaktadır (Şekil 2). İnceleme bölgesinin en yaygın ve yaşlı kayaçları 451±13 mil. yıl ile metavolkanitler kabul edilmektedir (Helvacı ve Griffin, 1983a). Güneydoğu-kuzeybatı doğrultusundaki koyu renkli bu kayaçlar, alttan üste doğru gnays, metavolkanit-metatüf ve metavolkanit-metaaglomeralara ayrılmaktadır (Şekil 2). Maden yatakları açısından metavolkanit-metatüfler önemlidir. Zira bunlar, Bitlis Masifi'nde cevherleşmelerin bağlı buldukları ve metavolkanit-metatüflerle ardalanmış amfibolit şistleri içerirler. Bunların değişik yoğunluktaki cevherleşmeleri saçınımlı cevherden masif cevhere kadar değişen mineralizasyonlar göstermektedir. Diğer metavolkanitler ancak düşük tenörlü ve az yayılım gösteren cevherleşmeler içerirler.

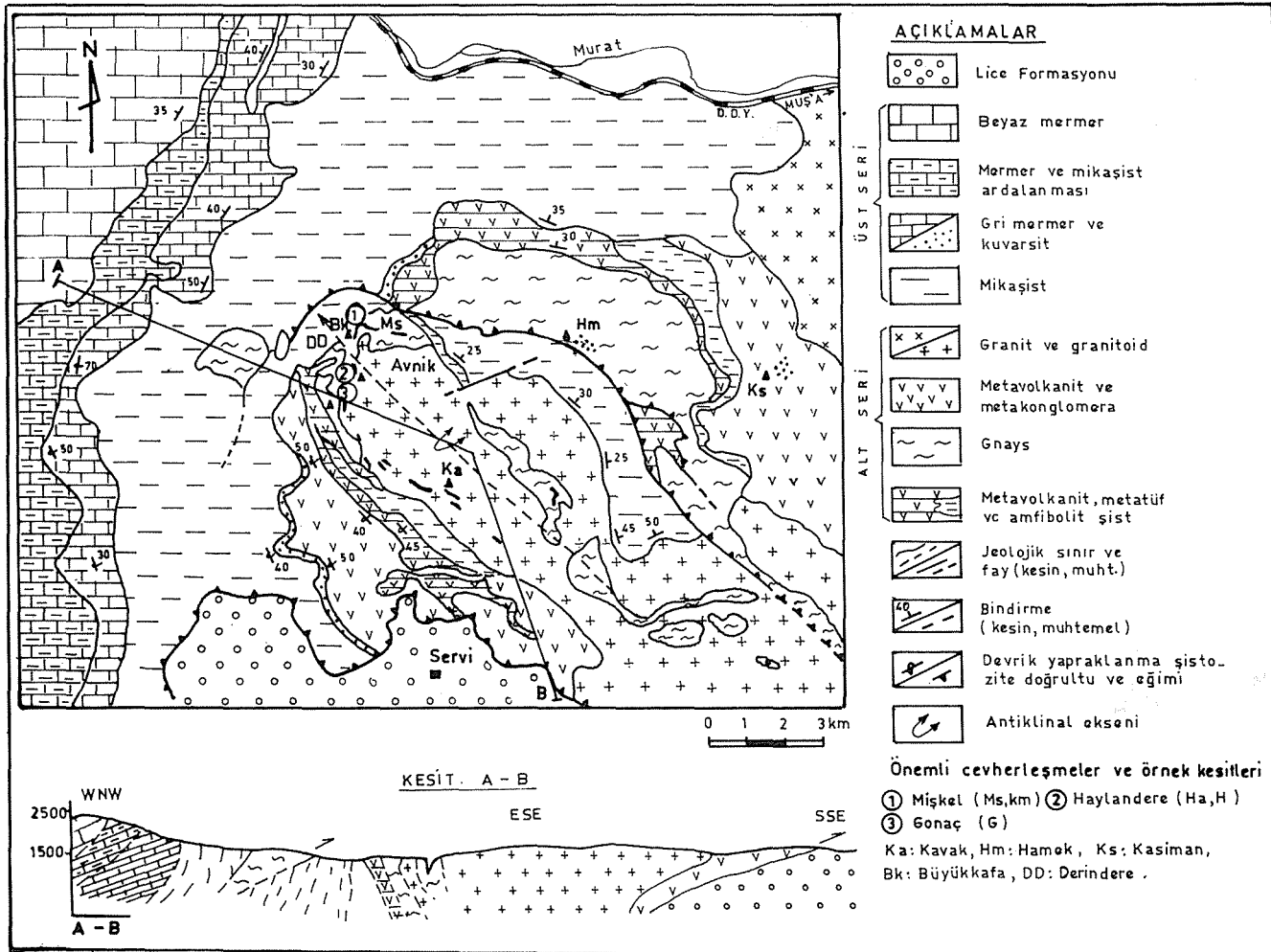
Mineralojik olarak metavolkanitler albit ve ortoklas gibi feldspat mineralleri ile, aktinolit, tremolit ve richterit gibi amfibol minerallerinden oluşmaktadır. Diğer önemli mineralleri kuvars, epidot, mika ve kloritlerdir. Az miktarda titanit ve ortite de rastlanmaktadır. İkincil mineralleri martit, uralit ve karbonatlar teşkil etmektedir (Çelebi, 1986, Erdoğan, 1982 ve Helvacı ve Griffin, 1983b).

347±53 mil. yıl ile Devon yaşlı sayılan granitoyitler, metavolkaniklere paralel güneydoğu-kuzeybatı yönünde uzanmakta ve yer yer inklüzyon veya eritilmiş metavolkanit parçalarını içermektedirler (Helvacı ve Griffin, 1983a). İyi gözlenebilir bir şistoziteye sahiptirler. En önemli mineralleri feldspat, kuvars ve mikalardır. Seyrek olarak epidot, titanit, manyetit, hornblend ve apatite de rastlanmaktadır.

Üst serinin mikaşistleri uyumsuz olarak alt seri üzerine oturmaktadır. Çok iyi tabakalanma ve foliyasyon gösteren bu birimin dokusu, kepeğimsi veya lifli kloritler ve mikalar tarafından belirlenmektedir. Diğer önemli mineralleri albit ve kuvarstır. Az miktarda karbonat, granat, manyetit ve hematit içerirler. Üste doğru Permiyen yaşlı gri mermerlerle ardalanan mikaşistlerden, tedricen kalın tabakalı, beyaz ve fosilsiz mermerlere geçilir. Bu rekristalize kireçtaşlarının ana mineralleri kalsit ve dolomittir. Çok az miktarda karışım halinde klorit ve mika da bulunmaktadır.

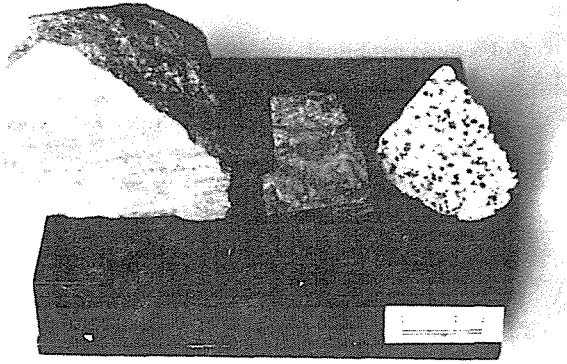
Avnik metamorfiteri oldukça silisleşmiş ve özellikle metavolkanitleri albitleşmişlerdir (Helvacı ve Griffin, 1983b). Bölgesel, kontakt ve retrograd metamorfizma geçirerek deforma olmuşlardır (Çelebi, 1986). Üst serinin çökmesinden önce sadece alt seriyi etkileyen ilk rejyonel metamorfizmadan sonra granitoyitlerin metavolkanitlere sokulumu sırasında en az bir kontakt metamorfizması meydana gelmiştir. Paleosen yaşlı Barrow tipi ve yeşil şist fasijesinde ikinci bir rejyonel metamorfizma her iki seriyi de etkilemiştir. Bunun sonunda meydana gelen retrograd metamorfizma idiomorf, düzensiz ve zonlu yapı gösteren minerallerin ve ağısı cevherin varlığı ile ispatlanmaktadır (Helvacı, 1984a ve Çelebi, 1986).

Çok sayıda antiklinal ve senklinal, doğu batı yönünde birbirine yaklaşık paralel uzanan bindirme fayları ile daha genç bir kırılma tektoniği Avnik Bölgesinin tektonik yapısını belirlemektedir. Kıvrımlanmaya neden olan birin-



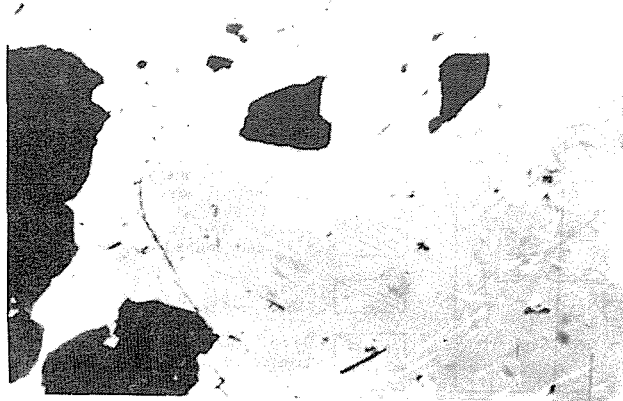
Şekil 2 Avnik ve yakın çevresinin jeolojik haritası ve kesiti (Erdoğan ve diğ., 1981'den; sadeleştirilmiştir).
Figure 2 Simplified geological map and cross-section of the Avnik region. Based on work of Erdoğan et al. (1981).

ci deformasyon üst serinin oluşumundan önce meydana gelmiştir. İki seriyi de etkileyen Paleosen yaşlı ikinci kıvrımlanma öncelikle bindirme faylarına neden olmuştur. Ana kıvrım (Gonaç Antiklinali) kuzeybatı-güneydoğu yönündedir (Erdoğan, 1982, Erdoğan ve Dora, 1983, Helvacı, 1983). Güneyde doğu-batı yönlü bindirme fayı boyunca kuzeydeki metamorfik kitle 20 km'ye kadar Lice Formasyonu üzerine itilmiştir. İkinci bir bindirme fayı da buna paralel olarak kuzeyde yer almaktadır (Şekil 2). Bunlara ek olarak çok sayıdaki kırılma ile aktinolit şistlerin cevherli kırık ve çatlak sistemleri ile sayılabilir.



Şekil 3 Avnik'ten apatitli manyetit cevherlerinden örnekler. Soldan sağa: Bantlı, ağsı ve saçınımlı cevher tipleri.

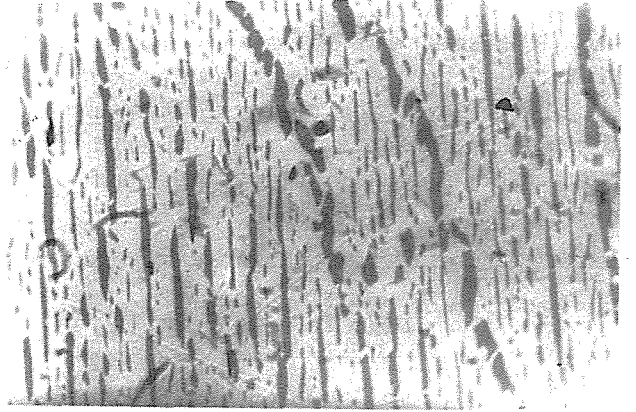
Figure 3 Ore Samples from the apatite bearing magnetite of Avnik. From left to right: Banded, stockwork and disseminated ore types.



Şekil 4 Manyetit'in tipik martitleşmesi ve hematit (açık gri). Martitleşme oktaedr yüzeylerine ve çatlaklara paralel olarak gelişmiştir. Koyu yerler gang mineralleridir. Çap. nic., 200x

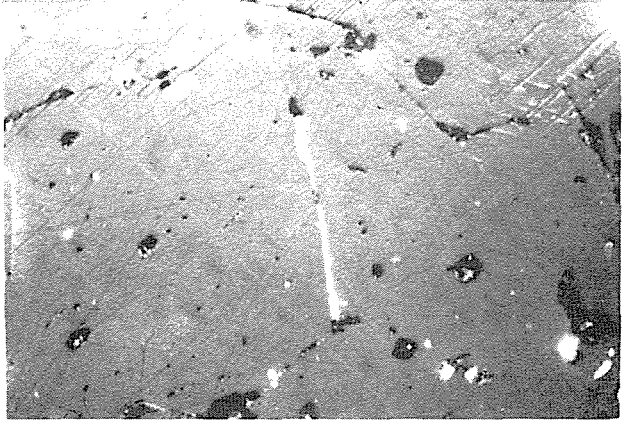
Figure 4 Typical martitization of the magnetite with hematite (light gray) regularly along the octahedral faces (111) of the magnetite crystals (gray) and fissures which are developed netlike. The dark places gangue material or holes. Cr. nic., enlarg.: 200x

Avnik bölgesinde ana kıvrım kenarlarında ve yakın çevrelerinde çok sayıda manyetit-apatit zuhuru bulunmaktadır (Şekil 2). Bunların en önemlileri Mişkel Haylandere, Gonaç, Murdere ve Kavaktır. Cevherleşmeler aktinolit şistlere bağlı bulunmaktadır. Masif, bantlı, ağsı ve saçınımlı olarak dört cevher tipi ayırılmaktadır (Şekil 3). Ekonomik öneme sahip cevher çeşitleri, manyetit ve florapatitten ibarettir. Kısmen martitleşme sonucu oluşan hematit de gözlenmektedir. (Şekil 4). Seyrek olarak titanit, rutil, alüminyum spinel (hersinit) ve ilmenit de yer almaktadır (Şekil 5, 6). Gang mineralleri olarak kuvars, aktinolit, epidot ve apatit sayılabilir.



Şekil 5 Levhamsı ilmenit (gri) ve hematit (açık gri) katı karışımları. çap. nic., 450x.

Figure 5 Tabular exulsions of ilmenite (gray) and hematite (light gray). Cr. nic., enlarg.: 450x.



Şekil 6 Martitleşme (açık gri çizgiler) başlangıcı gösteren manyetit içinde hersinit ($FeAl_2O_4$, ortada açık gri çubuk) ve rutil (TiO_2 , sağ alt köşede açık noktalar). Koyu yerler: Çatlak ve boşluklardır. Yağda çap. nic., 200x

Figure 6 Hercynite ($FeAl_2O_4$, light gray, light lines in the center), rutile (TiO_2 , light dots at the right lower corner) in light martitized magnetite (gray) and Gangue material or holes (black). In oil, par. nic., enlarg.: 200x

Avnik apatitli manyetit oluşuklarının cevher içeren kayaçları şimdi amfibolit şist olarak gözlenen bazaltik sokulumlardır (Çelebi, 1986). Tüm cevher zuhurları ve cevherleşme şekilleri aynı magmatik gelişmenin ürünleri olarak düşünülmektedir. Eşoluşumlu; saçınımlı, masif ve bantlı cevherlerin, magmatik ayırılmasından ayrı ayrı meydana gelen manyetit, apatit ve silikat eriyiklerinin (magmaların) türevleri olduğu düşünülmektedir. Ardoluşumlu cevherleşme ise, retrograt metamorfizma ile aktinolit şistlerin çatlak ve kırıklarını dolduran ağısı cevherlerdir.

Avnik'teki oluşum olaylarının sentezi, alt serinin oluşmasından sonra bölgenin bir deniz ortamına çöküşünü göstermektedir (Erdoğan ve diğ., 1981 ve Çelebi, 1986). Burada pelitik sedimanların çökmesi ile üst serinin ana kayaçları, bunu takip eden yükselme sırasında da şimdiki mermerlerin ana kayaçları olan kireçtaşları oluşmuşlardır.

Bu senteze göre Avnik manyetitli apatit yatağı, metamorfizmaya uğramış bir intrüziv magmatik yatak olarak tanımlanmaktadır (Helvacı, 1983, 1984a, b ve Çelebi 1986). Benzer yataklar olarak Kiruna/İsveç (Frietsch, 1978.), metamorf olmayan Cerre de Mercado/Meksika (Young ve diğ., 1969) ve El Laco/Şili (Frutos ve Oyurzun, 1975.) yatakları sayılabilirler.

ANALİTİK İNCELEMELER

Analiz Yöntemleri

Jeokimyasal analizler için Avnik'in çeşitli yerlerinden (Şekil 2) kesitler halinde serbest örnekleme ile alınan 1-2 kg ağırlığındaki yaklaşık 150 manyetit örneğinin 45'inde 17 elemente özgü kimyasal analizler yapılmıştır. Analize hazırlamak üzere önce yarılanan örnekler, 200 tane boyuna öğütülerek yaş olarak elenmişlerdir. Manyetik ayırma ve lup altında ayıklamadan sonra bir agat öğütücüde analiz inceliğine kadar öğütülmüşlerdir. Ana ve yan elementlerin (Si, Al, Fe, Mg, Ca, Ti, V) analiz sonuçları röntgen flöresans analizi, P spektral fotometre ve iz elementler (Mn, Cr, Ni, Co, Mo, Sn, Cu, Zn, Pb) ise, emisyon spektral analiz yöntemiyle saptanmışlardır. Kullanılan bu yöntemlerin hata oranı yaklaşık % ± 5 dolayında bulunmaktadır.

Manyetitin kimyasal bileşimi

Teorik olarak manyetit (FeO. Fe₂O₃) % 72.4 Fe içermektedir. (Rösler ve Lange, 1976). Bunun yaklaşık % 33'ü Fe²⁺'dan, % 67'si de Fe³⁺'dan ibarettir. Spinel strüktürü ve jeokimyasal özellikleri nedenleri ile manyetit, çok sayıda demir grubu elementi (Ti, Mn, V, Zn gibi) kristal yapısına bolca (% 2.5'a kadar) alabilmektedir. Cr., Ni ve Co gibi elementleri de ancak iz element olarak bünyesine kabul edebilir.

Avnik manyetitleri ortalama olarak % 67.46 Fe içermektedir. Teorik değerle olan yaklaşık % 5'lik Fe farkı manyetit içindeki yabancı elementlerle karışımlar, silisik kirlenme ve mikro kapanımlardan ileri gelmektedir (Çizelge 1). Yapılan hesap ve karşılaştırmalardan karışımların iz element-Fe ilişkisini etkilemediği ve manyetite bağlı olmayan iz element miktarının hata payı içinde buldukları anlaşılmıştır. Bunların yanında Avnik manyetitleri çok sayıda iz elementi nispeten yüksek oranlarda içermektedirler. Bunların bazıları, örneğin Cr. Cu ve Ni, standart sapmalarından anlaşılacağı gibi, çok dağıntırlar. Bu, örneklerin değişik cevher tiplerinden alınmalarından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla sapma katsayısının (standart sapma/ortalama değer) yüksek olduğuna işaret etmekte ve inceleme çalışmalarında sıkça örnek almayı gerektirmektedir.

Oksit	Ortalama değer (%)	Standart sapma (±)
Fe ¹⁾	67.46	2.04
SiO ₂	2.93	1.70
Al ₂ O ₃	0.32	0.28
MgO ²⁾	0.92	0.59
CaO	0.79	0.62
TiO ₂	0.23	0.24
P ₂ O ₅	0.53	0.46
MnO	0.05	0.03
V ₂ O ₃	0.13	0,05
Toplam oksit	99.08	
İz elementler [ppm]		
Cr	181	302
Co	25	11
Ni	155	138
Mo	9	3
Sn	66	6
Cu	9	11
Zn	272	108
Pb	131	51

Çizelge 1

Ayrılmış Avnik manyetitlerinin kimyasal analizleri ve standart sapmaları (n=45).

- 1) Toplam demir Fe olarak alınmıştır (% 93,18 Fe₃O₄'e tekabül eder).
- 2) Mg'nin ölçülebildiği (Mg>1000 ppm) 32 örnek ortalaması.

Table 1 Chemical analyses of separated magnetites from Avnik and their standard deviatos (n=45 samples).

- 1) Total iron (corresponds to 93,18 % Fe₃O₄).
- 2) The avarage of 32 samples (Mg>1000 ppm).

İyon yarıçapı(Å) ¹⁾ (6'lı koordinat)	İyon içeriği [ppm]		Zenginleşme (+) / Fakirleşme (-) kats ³⁾			
	Manyetit (a)	Clarke ²⁾ (b)	Apatit (c)	Clarke (a:b)	Apatit (a:c)	
Fe ²⁺ (0.63)						
+ Fe ²⁺ (0.69)	674.000 ⁴⁾	50.000	1.600	+13	+422	
Ana elementler (öncelikle kanşım ve kirlenmeler)						
Al ³⁺ 0.81 (-3)	1.700	81.300	2.900	-48	-1.7	
Mg ²⁺ 0.80 (+27)	5.500	20.900	1.600	-3.8	+3.4	
Fe ³⁺ 'nin (0.63)	674.600	50.000	1.600	+13	+422	
yerine geçen iyonlar						
Ti ⁴⁺ 0.69 (+10)	1.400	4.400	134	-3.1	+10	
Cr ³⁺ 0.70 (+11)	181	100	44	+1.8	+4.1	
V ³⁺ 0.72 (+14)	870	135	87	+6.4	+10	
Mo ⁴⁺ 0.73 (+16)	9	1.5		+6		
Sn ⁴⁺ 0.77 (+22)	66	2		+33		
Pb ⁴⁺ 0.86 (+37)	131	13	14	+10	+9	
Fe ²⁺ 'nin (0.69)	674.600	50.000	1.600	+13	+422	
yerine geçen iyonlar						
Co ²⁺ 0.73 (+6)	25	25	8	+1	+3	
Mn ²⁺ 0.75 (+9)	404	950	246	-2.4	+1.6	
Ni ²⁺ 0.77 (+12)	155	75	9	+2	+17	
Cu ²⁺ 0.81 (+17)	9	55	8	-6	+1	
Zn ²⁺ 0.83 (+22)	272	70	3.8			

Çizelge 2

Avnik manyetitlerinin (n=45) iz element konsantrasyonları, Clarke ve apatit (n=32, Çelebi, 1992) değerlerine göre zenginleşme oranları.

- 1) 1A=0,1 nm, yarıçaplar Whittaker ve Muntus'tan (1970)
- 2) Clarke ve Washington (1924) ile Taylor'e (1964) göre
- 3) Zenginleşme oranı, manyetitteki bir iyon miktarının Clarke değerine veya apatitteki değerine bölümüdür. Bu bölümün tersi, manyetitteki miktarın daha az olması halinde, azalma (fakirleşme) oranıdır.
- 4) Clarke değerleri nedeniyle Fe²⁺ ve Fe³⁺ için toplam Fe miktarı alınmıştır.

Table 2

Trace element concentrations of magnetite (n=45) from Avnik and their enrichment factors in relation to Clarke and their values in apatites (n=32, Çelebi, 1992)

- 1) 1A=0,1 nm, radii after whittaker and Muntus (1970)
- 2) Clarke and Washington (1924) and Taylor (1964)
- 3) Enrichment factor is the division of an element concentration in magnetite to Clarke or their content in apatite. The reciproke value is the impoverishment factor, if the concentration in magnetite is lower
- 4) Total Fe content, because of Clarke for Fe²⁺ and Fe³⁺

Jeokimyasal yorumlama

Fe²⁺.Fe³⁺O₄ kimyasal bileşimi ile manyetit, genel formülü X²⁺Y³⁺O₄ olan "Spinel" grubuna girmektedir. İki değerlikli katyonlar X²⁺ yerine normal spinelde Mg, Fe²⁺, Zn; üç değerlikli katyonlar Y³⁺ yerine de Al, Cr, Fe³⁺ ve Mn diyadoh olarak birbirlerinin yerine geçebilmektedirler. Bu çok yönlü diyadohi çok çeşitli minerallerin doğmasına ve yapılarına çok değişik elementlerin alınmasına neden olur. Manyetitte en yaygın örnek Fe²⁺ yerine Mg, Mn, Zn; Fe³⁺ yerine de Al, Cr, Ti ve V gibi elementlerin her zaman bulunmasıdır. Bunların ve daha az bulunan Ni, Co, Cu gibi diğer elementlerin konsantrasyon değişimi ile bağıntılarından, oluşum sırasındaki belli jeokimyasal kurallara uymaları nedeniyle, önemli ipuçları elde etmek mümkündür.

İncelenen manyetitlerin analiz sonuçları, tespit edilen elementlerin iyon yarıçapları, yükleri, Clarke ve apatitteki değerlerine göre zenginleşme oranları Tablo 2'de verilmiştir. Görüldüğü gibi burada ana elementlerden Al ve Mg Clarke değerlerine oranla oldukça seyrelmişlerdir. Bu seyrelme, ancak manyetitin saflaştırılması ile açıklanabilir. Kendi minerallerini oluşturan bu elementler, yankayaçta yoğunlaştıklarından, manyetitte daha bolca bulunmaları beklenemez. İz elementlerden sadece Ti, Mn ve Cu'nun Clarke değerlerine oranla azaldıkları apatitteki içeriklerine oranla da zenginleştikleri görülmektedir. Diğer elementlerin tümü hem Clarke, hem de apatitteki değerlerine göre zenginleşmişlerdir. Bu da diğer elementlerin Fe'nin yerine bolca geçtiğini göstermektedir. Bunlardan Pb, genel olarak Pb²⁺ (1,26 Å) olarak bulunmakta ve sadece 4'lü koordinasyonla (1.02 Å) Fe³⁺'nin yerine geçebilmektedir. Zira 6'lı koordinasyonla Fe²⁺'nin yerine geçmeyi tercih eder (Wedepohl, 1956). Ancak oksidasyon koşullarının uygun olduğu ortamlarda Pb²⁺'nin kolayca Pb⁴⁺'ya yükseltgenmesi ve küçük iyon yarıçapı dikkate alınarak kurşunun burada Pb⁴⁺ iyonu ele alınmıştır.

Fe³⁺'nin yerine geçen iyonlar

Ringwood'a (1955) göre yakın büyüklükte yarıçapları olan iki elementten elektronegativitesi düşük olan element, kristal kafesine öncelikle alınır. Buna göre V³⁺ (0,72 Å, 1,35 V) eşit değerliği, yakın büyüklükteki iyon yarıçapı ve düşük elektronegativitesi ile Fe³⁺'nin (0,63 Å, 1,9 V) yerine en çok geçen elementtir (saklanma). Dolayısıyla manyetitin V içeriği apatitinkinden 10 kat, Clarke değerinden de 6 kat daha fazladır (Çizelge 2).

İyon yarıçapı Vanadyum'unkine göre Fe³⁺'nin yarıçapına daha yakın (+ % 11) olmasına rağmen Cr³⁺ (0,70 Å, 1,6 V), manyetitte Clarke değerine göre ancak 1,8 kat, apatite göre de 4, 1 kat zenginleşebilmiştir. Buna göre manyetit

apatite oranla 4 misli daha fazla Cr bünyesine alarak yoğunlaşmasını sağlamıştır. Öte yandan v^{3+} 'nın daha büyük iyon yarıçapına karşın Cr^{3+} 'dan daha fazla yoğunlaşması, ancak v^{3+} 'nın elektronegativitesinin (1,35 V) Cr^{3+} 'ninkinden (1,6 V) daha düşük olması ile açıklanabilir.

İyon yarıçapı +% 10 farkla Fe^{3+} 'ninkine en yakın olmasna rağmen, değerlik fazlalığından dolayı Ti^{4+} (0,69 A, 1,6 V) manyetitte Clarke değerine göre 3 defa azalmıştır. Ancak apatite oranla 10 defa daha fazla Ti içermektedir. Ti^{4+} muhtemelen yankayaçta Al^{3+} 'nın yerine geçerek titanit olarak bileşik teşkil etmeyi tercih etmiştir. Amfibolit şistlerdeki % 0,65'lik Ti konsantrasyonu bunu doğrulamaktadır (Çelebi, 1986).

Avnik manyetitlerinde 4 değerlikli diğer katyonlar Clarke değerlerine göre en çok zenginleşen iyonlardır (Çizelge 2). Bunlardan Sn 33, Pb 10 ve Mo 6 kat Clarke değerlerine oranla daha fazla bulunmaktadır. Apatite göre manyetitin Pb konsantrasyonu 9 kat daha fazladır. Sn ve Mo ise, apatitlerde tesbit edilmemiştir.

Bu iz elementlerin manyetitte yoğunlaşmaları, ancak manyetitin kristal yapısının elverişliliğine (spinel strüktür), iyon yarıçaplarının hem Fe^{3+} 'nın (0,63 A), hem de Fe^{2+} 'nin yarıçapına (0,69 A) yakınlığına, yüklerinin büyüklüğüne, elektronegativitesinin düşüklüğüne (Fe^{3+} : 1,9 V, Mo^{4+} : 1,6 V, Pb^{4+} : 1,8 V, Sn^{4+} : 1,9 V) ve uygun oluşum koşullarına (orta sıcaklık, yüksek basınç) bağlanabilir. Goldschmidt (1937) Kuralına göre yarıçaplarının büyüklüğü birbirine yakın iki iyondan büyük yüküsü diadok olarak tercihen yapıya bağlanır. Ancak yüklerin eşitlenmesi için kristal yapıya düşük yüklü başka bir iyonun girmesi gerekir. Örneğin; $2Fe^{3+} + Mo^{4+} + Fe^{2+}$ veya $2Fe^{2+} + Pb^{4+} + Fe^{2+} + 2Fe^{3+}$ gibi. Bu iyonlar, manyetitin spinel yapısından dolayı, hem Fe^{3+} 'nin hem de Fe^{2+} 'nin yerine girebilmektedirler.

Öte yandan Ringwood'a (1955) göre benzer yarıçaplı iki iyondan düşük elektronegativitesi olan iyon diyadok olarak tercih edilir. Buna göre Pb^{4+} (0,86 A, 1,8 V), Mo^{4+} (0,73 A, 1,6 V) ve Sn^{4+} (0,77 A, 1,9 V) Fe^{3+} 'ya (0,63 A, 1,9 V) tercih edilirler. Metamorfizma koşullarına özgü yüksek basınç ve orta sıcaklık da bu elementlerin manyetitin bünyesine girmelerini kolaylaştırarak önemli miktarda zenginleşmelerini sağlamıştır.

Fe^{2+} 'nin yerine geçen iyonlar

Clarke değerine göre zenginleşen diğer elementler Zn (3,8 defa) Ni'dir (2 defa). Kristal yapısından dolayı apatite zor girebilen Ni, manyetite 17 kat daha fazla alınmıştır. İyon yarıçapı, Fe^{2+} 'nin iyon yarıçapına (0,69 A, 1,8 V) %22 daha büyük olan Zn $^{2+}$ iyonu (0,83 A) daha düşük elektronegativitesi (1,6 V) nedeni ile manyetite öncelikle

alınmıştır. Zn'nun, Ni'e göre mağmada olasılıkla daha çok bulunmasından ve elektronegativitesinin düşüklüğünden dolayı manyetitte daha çok zenginleşmiştir. Toplam cevher analizlerinin (Ni: 88 ppm, Zn: 181 ppm) gösterdiğine göre bu iki element de büyük ölçüde manyetitin bünyesine alınmışlardır.

İncelenen manyetitlerde Co konsantrasyonu Clarke değeri dolayında bulunmaktadır. Ancak apatitteki içeriğine göre 3 kat zenginleşmiştir. Buna karşın Mn ve Cu Clarke değerine göre sırasıyla 2,4 ve 6 defa fakirleşmişlerdir. Manyetitteki Cu, apatitle yaklaşık aynı ortalama değeri vermektedir. Mn ise 1,6 kat daha fazladır. Amfibolit şist ve toplam cevher analizlerindeki Mn miktarlarının (1100 ve 1000 ppm Mn) olduğu saptandığına göre bu elementler öncelikle Fe-Mg minerallerine, örneğin aktinolite, bağlandıkları düşünülmektedir. Mn/Fe-Mn pozitif korelasyonu (Şekil 8) Mn'in ayrışmanın son fazlarında Fe'e oranla zenginleşmesi de bu tezi desteklemektedir.

JEOİSTATİSTİK İNCELEMELER

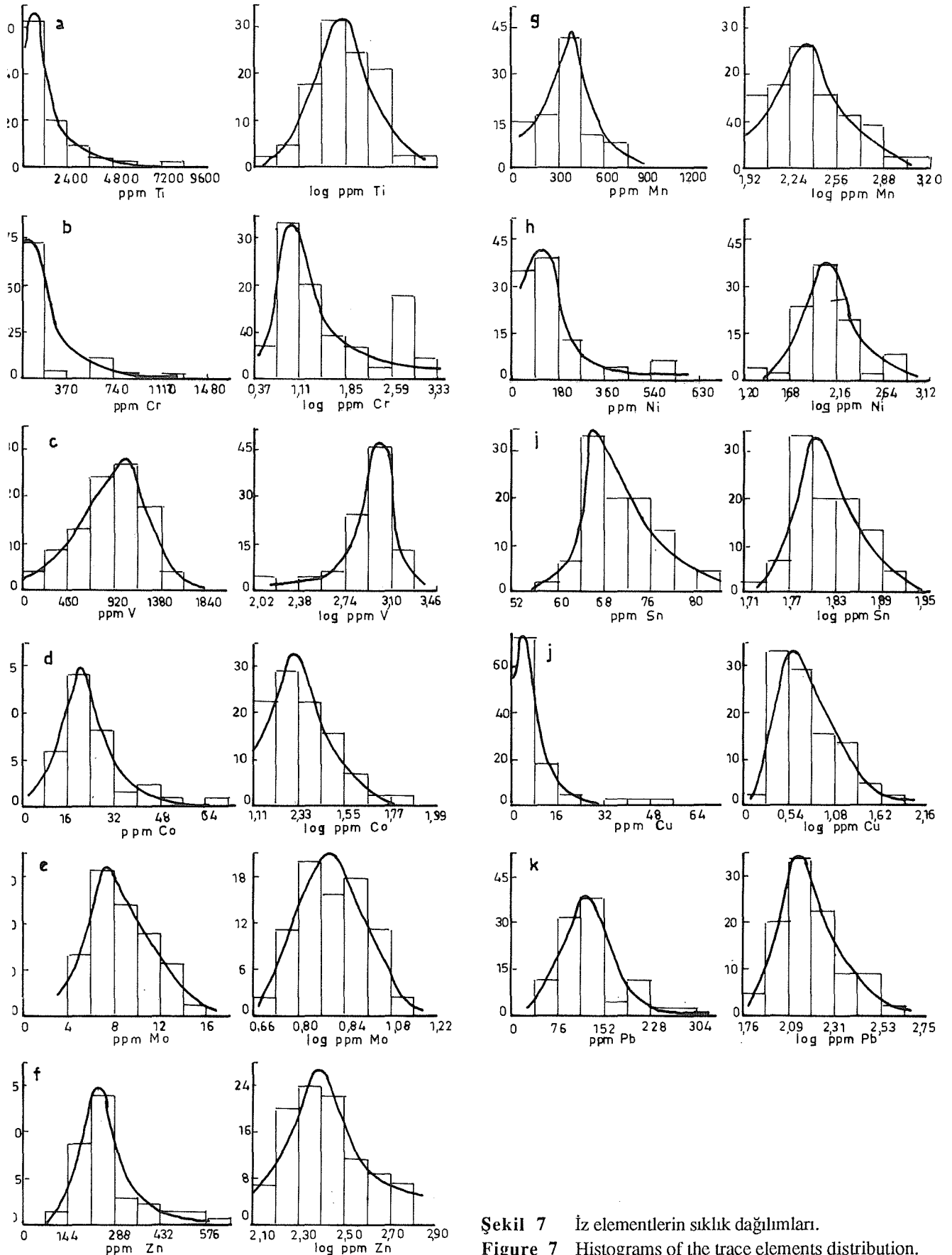
Elementlerin sıklık dağılımları örnek sayısına, alındıkları yerlerin ve noktaların durumuna bağlıdır (Ahrens 1966). Burada 45 manyetit örneğinin Çizelge 2'de gösterilen elementlerinin ilişkileri incelenecektir. Örneklerin alındığı yerler, Avnik'te büyük yayılım ve değişik derişimdeki manyetit ve apatit cevherleşmeleri gösteren zuhurlarda açılan, çoğunlukla sondaj, yarma ve kısmen de noktaları temsil eder (Şekil 2). Şimdiye kadar yapılan çalışmalar, değişik zuhurların aynı özellikte cevherleşmeler içerdiklerini, ancak sadece yapısal farklılık gösteren cevher tipleri olduklarını göstermektedir (Çelebi, 1986; Helvacı, 1984a ve b; Erdoğan ve Dora, 1983). Yapılan testler, değişik zuhurlardan alınan örneklerin iz element içeriklerinin bir bütünlük içinde incelenebileceğini göstermektedir. Buna dayanarak tüm örnekler bir küme olarak ele alınmıştır. İstatistiksel dağılım için gerekli sütun sayısı i ve bunların sınırları $k: i=1+3, 32. \log n$ ve $k=X_{max} - X_{min}/i$ Sturge formülü ile hesaplanmıştır (n: örnek sayısını, X: max. ve min. uc değerleri gösterir). Ortalama değerler, bunlara ait standart sapmalar, tepe (mod) ve ortanca (medyan) değerleri normal jeoistatistik çalışmalarında yer alan formüllerle hesaplanmıştır.

Sıklık dağılımı

Avnik'teki iz elementlerin sıklık dağılımları bir logaritmik normal (log normal) dağılım sergilemektedir (Şekil 7). Log normal dağılım özellikle magmatik kayaç ve mineraller için karakteristiktir (Ahrens, 1954a, b ve Rodionov, 1964). Ayrışmanın normal koşullarda gerçekleştiğini ve ikincil etkenlerin, örneğin metamorfizmanın, önemli

Örnek yüzdesi

Örnek yüzdesi



Şekil 7 İz elementlerin sıklık dağılımları.
Figure 7 Histograms of the trace elements distribution.

rol oynamadığını ortaya koymaktadır. David'e (1977) göre logaritmik normal dağılım, magmatik ayrılaşmanın ve elementlerin ağırlıklı olarak belli minerallere bağlanmalarının sonucudur.

İncelenen elementlerden sadece V bir negatif eğim (sağ asimetri) göstermektedir. Diğer elementler pozitif eğimlidir (sol asimetrik, Tablo 3 ve Şekil 7). Asimetri ve log normal dağılım, elementlerin istatistiki dağılımlarının ve dinamik denge durumunun bir sonucu olduğunu gösterir (Smirnov, 1963). Ayrıca pozitif eğim, mineraldeki element oranlarının düşük değerlerinin çoğunlukta olduğuna işaret etmektedir (fakir element tipi). Dolayısıyla Avnik manyetitlerindeki iz elementler, çeşitli olmakla beraber, oranları yüksek değildir. Sadece V, Fe'e olan jeokimyasal yakınlığı ve mağma bileşimi nedeniyle, bir istisna teşkil etmektedir (Şekil 7 ve Çizelge 3).

Mo ve Sn dışındaki elementlerin tümü standart dağılım eğrisinden (çan eğrisinden) daha sivridir (Çizelge 3). Bu elementlerin analiz değerlerinin çoğu belli konsantrasyon aralıklarında yoğunlaşmışlardır. Yassılık gösteren V, Mo ve Sn elementlerinin oranları daha düzenli bir istatistiksel dağılım göstermektedir.

Bu elementlerin standart sapma/ortalama değer oranları (varyasyon katsayısı) da küçüktür (V: % 39, Mo: % 30 ve Sn % 9). En büyük varyasyon katsayısı Cr (% 166) ve Ti'da (% 100) görülmektedir. Bu, Cr'un özellikle saçınımlı manyetitlerde yoğunlaşması ve Ti'nin da özellikle ağırsı cevherlerde zenginleşmeleri veya manyetit içindeki örneğin titanyum mikro kapanımlarıyla açıklanmaktadır (Helvacı, 1984b, Çelebi, 1986).

İncelenen iz elementlerin olasılık kağıdındaki dağılımları da nümerik ve logaritmik dağılımları genellikle uyumlu görülmektedir. İz element dağılımının log normal dağılım olduğu kümülatif logaritmik sıklıklarının doğrusal dağılımlarından anlaşılmaktadır (Şekil 8). Nümerik kümülatif dağılımları normal dağılım gösteren elementler sadece Cr. Ve Mo'dir (Şekil 8 a, c). Zenginleşen veya fakirleşen elementlerin dağılımları aynı eğilimi göstermektedirler.

Korelasyon ve regresyon analizi

Avnik'te çok sayıda element çiftinin ilişkisi magmatik gelişmenin yasalarına uygunluk göstermekte ve saha gözlemleri ile bütünleşmektedir. Örneğin manyetit cevherindeki Fe ve P arasındaki negatif korelasyon (Çelebi, 1986), aynı zamanda arazide gözlenen masif manyetit apatit ve silikatsız veya bunlarca çok fakir olması gibi özelliklerle bütünleşmektedir.

Manyetit, kristal yapısı nedeniyle çok sayıda elementi kristal yapısına alabilmektedir. Öncelikle oluşum ısısı ta-

rafından belirlenen bu elementlerin belirtken korelasyonu, substitüsyon için bir kontrol faktörü olan iyon yarıçaplarının benzerliğinden kaynaklanmaktadır (Çizelge 2).

Çizelge 4'te incelenen elementler arasındaki korelasyon katsayılarından anlaşıldığı gibi, özellikle Fe²⁺'nin yerine geçen elementlerden Co-Zn, Co-Pb, Pb-Zn ve Cu-Ti iyi korele olmaktadır (Şekil 9a, b). Goldschmidt Kuralına göre yarıçaplarının büyüklüğü birbirine yakın, ama farklı iyon yüküne sahip iki elementten büyük yüklüsü tercihen iyon kafesine alınır. Dolayısıyla manyetitin kristal yapısına Pb⁴⁺ (0,86 Å), Fe³⁺'ye (0,63 Å) öncelikle alınır. Yük farkını gidermek için kristale Pb⁴⁺ + 2Fe²⁺ → 2Fe³⁺ + Fe²⁺ denklemine göre Fe²⁺'nin bağlanması gerekmektedir. Aynı teorik esaslara göre Pb⁴⁺, Co²⁺ (0,73 Å, 1,8 V) ve Zn²⁺'nin (0,74 Å, 1,6 V)'de yerine dörtlü koordinasyonla geçebilir. Bu gelişme matematiksel olarak pozitif korelasyon şeklinde görülür (Çizelge 4). Ayrıca çinko elementinin tercihen Co ile birlikte spinel strüktürlü magmatik Fe minerallerine girdiği de bilinmektedir (Wedepohl, 1956 ve Scharbert 1984) Şekil 9c'deki Pb-(Co+Zn) arasındaki belirgin pozitif korelasyon Pb. Co ve Zn arasındaki bu ilişkiyi doğrulamaktadır. Cu-Ti pozitif korelasyonu da aynı esaslara bağlanmaktadır. Zira Ti⁴⁺ (0,69 Å) Fe³⁺'nin (0,63 Å) yerine, Cu²⁺ (0,81 Å) de Fe²⁺'nin (0,69 Å) yerine geçerek manyetitin kristal yapısında paralel yoğunlaşırlar.

Magmatik ayrılaşmaya işaret eden diğer buluntulara Mo-Mo/Sn ve Mg-Mg/Co korelasyonları örnek verilebilir (Şekil 9d, e). Ringwood'un (1955) "yarıçapları yakın büyüklükteki elementlerden düşük elektronegativitesi olan elementin öncelikle kristal yapıya alınması" prensibine göre Mo³⁺ (0,73 Å, 1,6 V) Sn⁴⁺'ya (0,77 Å, 1,9 V) oranla daha çok manyetite bağlanarak ayrılaşmanın sonuna doğru mağmadaki Mo/Sn oranının küçülmesine neden olur. Magmada azalan Mo konsantrasyonuna paralel olarak Mo/Sn oranı da küçülür ve böylece Mo-Mo/Sn pozitif korelasyonu ortaya çıkar (Şekil 9d). Aynı esaslara dayanan Mg-Mg/Co pozitif korelasyonu bu ilişkiyi kanıtlamaktadır (Şekil 9e, Mg²⁺:0,80 Å, 1,2 V ve Co²⁺: 0,73 Å, 1,8 V).

SONUÇ

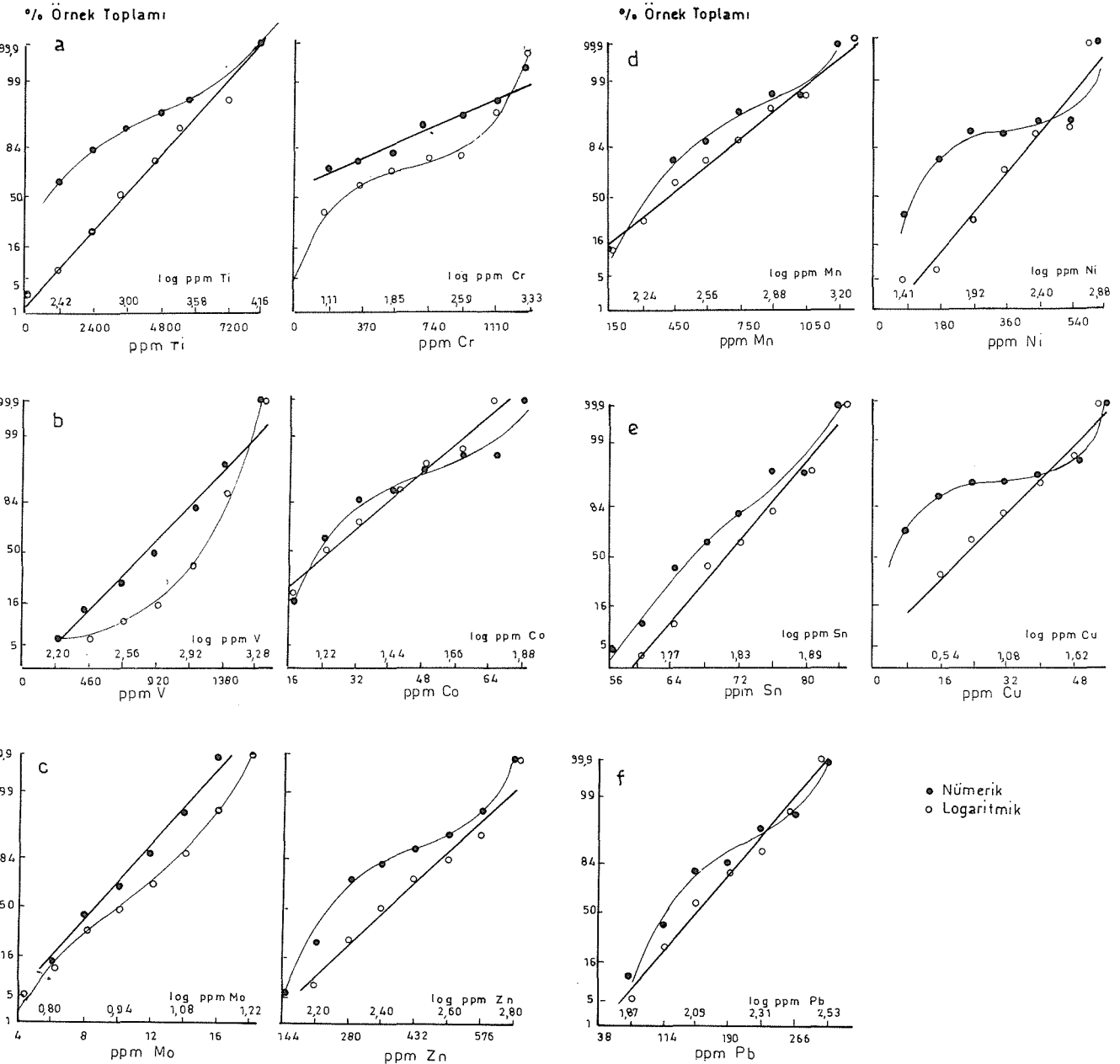
Burada bulunan jeokimyasal ve jeostatistiksel sonuçlar, Avnik manyetit oluşuklarının intrüviz magmatik kökeni ile ilgili tezleri doğrulamaktadır. (Çelebi, 1986 ve 1992; Helvacı, 1983, 1984a ve b). Şimdiye kadar yapılan araştırmaların sonucuna dayanarak en az bir kez metamorfizma geçirmiş, Kiruna tipi (İsveç) bir intrüviz magmatik yatak olarak tanımlanabilir. Bundan sonra Bitlis Masifi'nde ve Avnik yöresinde yapılacak arama ve inceleme çalışmalarında Fe, P ve As'in yanında (Çelebi, 1992) Sn ve kısmen de Mo ile Pb izsürtücü element olarak kul-

lanılabilirler. Gerçekleştirilen inceleme çalışmaları bir fizibilite etüdünün yapılmasına yeterli görülmektedir (Çelebi, 1989). Kurulacak maden işletmesi ve ona bağlı yan tesisler (örneğin fosforik ve flüorik asit üretimi gibi) endüstri bakımından fakir olan Bingöl yöresinin ekonomik kalkınmasına büyük katkı sağlayacaktır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışmada Berlin Teknik Üniversitesi'nde hazır-

lanan doktora tezi analiz verileri esas alınmıştır. Araştırmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen Berlin Teknik Üniversitesi Maden Yatakları Enstitüsü'nün tüm elemanlarına ve doktora çalışmalarına mali destek sağlayan MTA Genel Müdürü S. Sancar'a teşekkür borçluyum. Verimli tartışmaları, yayını gözden geçirmesindeki katkılarından ötürü A. Sağıroğlu'na (FÜ) ve şekilleri temize çeken sayın D. Yılmaz'a (FÜ) çok teşekkür ederim.

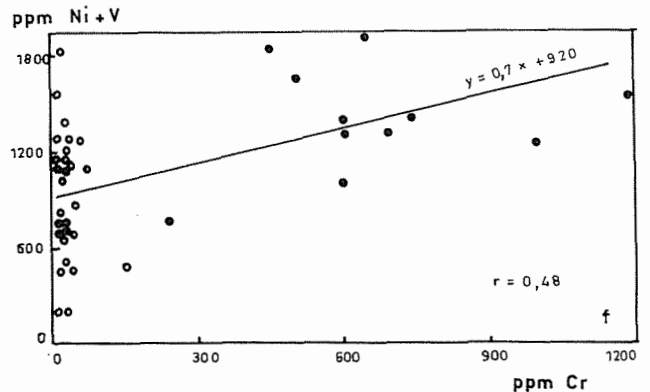
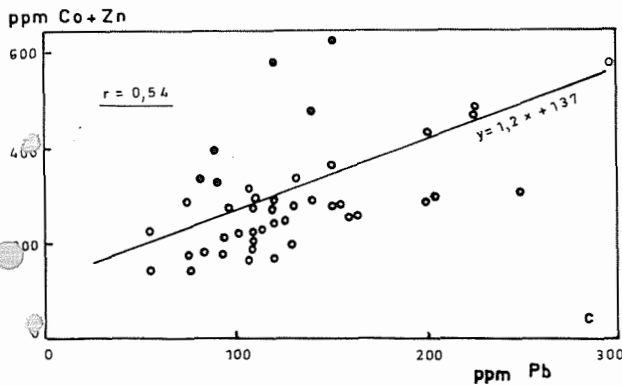
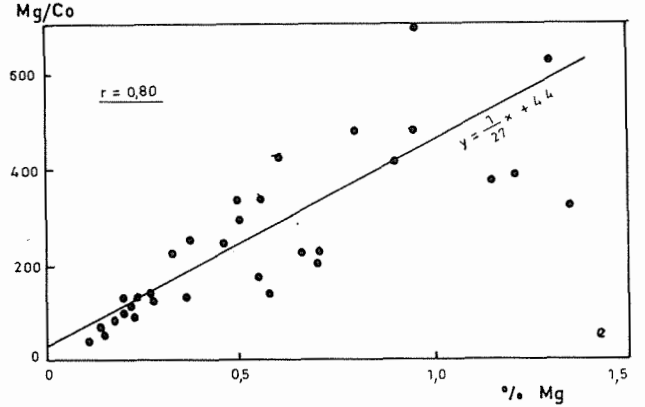
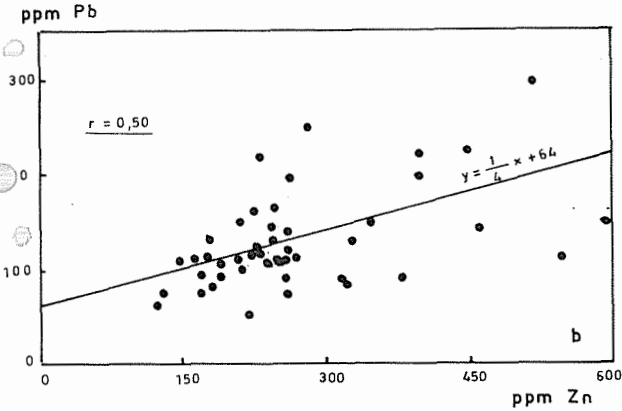
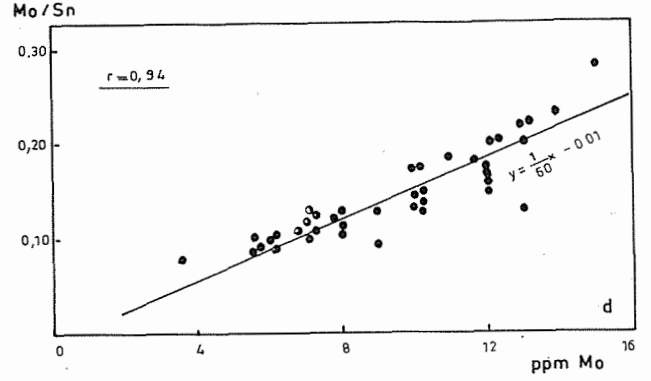
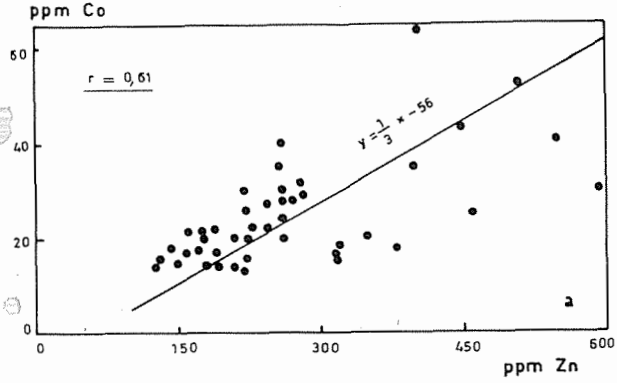


Şekil 8 Olasılık kağıdında kümülatif iz element dağılımları.
Figure 8 Cumulative trace element distributions plotted on probability paper.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Ahrens, L.H., 1954a, The lognormal distribution of the elements (1). Geochim. et Cosmochim. Acta 5, 49-73.
 Ahrens, L.H., 1954b, The lognormal distribution of the elements (2). Geochim. et Cosmochim. Acta 6, 121-131.
 Ahrens, L.H., 1966, Element distribution in specific igneous rocks-VIII. Geochim. et Cosmochim. Acta 30, 109-122.
 Çelebi, H., 1986, Die Genese der Magnetit-Apatit-Lagerstätte Avnik, Prov. Bingöl/Ost-Türkei und ihre wirtschaftsgeologische Bewertung. 214 s, yayınlanmamış doktora tezi, Berlin Teknik Üniversitesi.

- Çelebi, H., 1989, Ansätze zur rohstoffwirtschaftlichen Bewertung der Magnetit-Apatit-Lagerstätte Avnik/Ost-Türkei. Erz-metall 42 (2), 78-85.
 Çelebi, H., 1992, Geochemie des metamorphen Fluorapatits von Avnik, Ost-Türkei. Chemie der Erde 52, 115-129.
 Clarke, F.W. ve Washington, H.S., 1924, The composition of the earth's crust. Mason, B. ve Moore, C.B., 1985, Grundzüge der Geochemie'de: Enke Verl., Stuttgart, 340 s.
 David, M., 1977, Geostatistical ore reserve estimation. Elsevier Scient. Publ. Camp., Bd.2, Amsterdam, 364 s.
 DPT (Devlet Planlama Teşkilatı yayınlıyan), 1988, Demir



Şekil 9 Manyetitlerdeki bazı önemli elementler konsantrasyonu arasındaki korelasyonlar (değerlerdeki saçılmalar değişik cevher tiplerinden kaynaklanmaktadır).

Figure 9 Correlations between concentrations of important elements in magnetites (the scattering of values causes the different ore types).

	Min. değer	Arit. ortal.	Max. değer	Tepe (mod)	Oranca (medyan)	Eğim (+/-)	Sivrilik (+/-)
Element (ppm)							
Ti	100	1400	8000	800	900	+2.53	+7.57
Cr	5	181	1200	16	17	+1.75	+2.04
V	100	870	1600	1000	900	-0.19	-0.02
Co	13	25	65	20	21	+1.39	+2.23
Mo	5	9	15	7	8	+0.43	-1.81
Zn	130	272	600	225	245	+1.31	+1.26
Mn	100	404	1100	330	360	+0.54	+1.90
Ni	16	155	600	100	110	+2.06	+3.44
Sn	54	66	80	64	65	+0.29	-0.01
Cu	1	9	55	3	4	+2.37	+5.98
Pb	55	131	300	114	120	+1.23	+1.48

Çizelge 3 İz element sıklık dağılımlarının önemli parametreleri (Pozitif eğim: Sol asimetric, negatif eğim: Sağ asimetric dağılım; pozitif sivrilik: Standart çan eğrisinden yüksek, negatif sivrilik: Standart çan eğrisinden yassı demektir, n=45).

Table 3 Important parameters of trace elements distributions (Positive skewness: Left asimetric, negative skewness: Right asimetric distribution. Positive kurosis: Higher than standart normal curve, negative kurosis: Flater than standart normal curve, n=45).

- Çelik Hammaddeleri. DPT yayın no.: 2126, Ankara, 250 s.
- Erdoğan, B., 1982, Bitlis Masifi'nde Avnik (Bingöl) yöresinin jeolojisi ve yapısal özellikleri. Yayınlanmamış doçentlik tezi, 106s., Dokuzeylül Üniv., İzmir.
- Erdoğan, B. ve Dora, O. Ö., 1983, Bitlis Masifi apatitli demir yataklarının jeolojisi ve oluşumu. TJK Bülteni, C. 26, 133-144.
- Erdoğan, B., Dora, O. Ö., ve Helvacı, C., 1981, Avnik (Bingöl) yöresi apatitli demir yataklarının jeolojisi ve oluşumu. Yayınlanmamış rapor, Dokuzeylül Üniv., İzmir, 80 s.,
- Frietsch, R., 1978, On the magmatic origin of the iron ore of Kiruna type. Econ. Geol. 73, 478-485.
- Frutos, J. J. ve Oyurzun, M. J., 1975, Tectonic and geochemical evidence concerning the genesis of El Laco magnetite lava flow deposits, Chile. Econ. Geol. 70, 988-990.
- Goldschmidt, V. M., 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. Rösler, H. J. ve Lange, H., 1976. Geochemische Tabellen'de: Enke Verl., Stuttgart, 674 s.
- Hegemann, F. ve Albrecht, F., 1954, Zur Geochemie oxydischer Eisenerze. Chemie der Erde 7, 81-103.
- Helvacı, C., 1983 Bitlis Masifi Avnik (Bingöl) Bölgesi metamorfik kayalarının petrojenezi. TJK Bülten, C. 26, 117-132.
- Helvacı, C., 1984a, Bitlis Masifi Avnik (Bingöl) yöresi apatitli demir yataklarının oluşumu. Jeol. Müh. 19, 33-51
- Helvacı, C., 1984b. Apatit-rich iron ore deposits of the Avnik (Bingöl) region, southeastern Turkey. Econ. Geol. 79, 354-371.

Ti	1.00																		
Cr	0.21	1.00																	
V	0.05	0.38	1.00																
Co	-0.07	-0.13	-0.23	1.00															
Mo	0.18	0.26	0.00	0.06	1.00														
Zn	-0.09	-0.21	-0.19	0.61	0.12	1.00													
Mn	0.28	0.13	0.12	0.08	0.08	-0.15	1.00												
Ni	0.21	0.39	0.27	0.17	0.36	0.06	0.20	1.00											
Sn	-0.18	-0.27	-0.21	0.28	-0.09	0.11	0.16	-0.17	1.00										
Cu	0.57	-0.09	-0.15	0.17	0.25	-0.03	0.25	-0.16	0.22	1.00									
Pb	-0.05	0.01	0.06	0.69	0.06	0.50	0.23	0.17	0.20	0.08	1.00								
	Ti	Cr	V	Co	Mo	Zn	Mn	Ni	Sn	Cu	Pb								

Çizelge 4 Manyetite iz elementler arasındaki korelasyon katsayıları (n=45, belirtken korelasyon katsayısı $|r|>0.25$).

Table 4 Interelement correlation coefficients in magnetite (n=45, significant correlation coefficient $|r|>0.25$).

- Helvacı, C. ve Griffin, W. L., 1983a, Rb-Sr geochronology of the Bitlis Massif. Avnik (Bingöl) area, S.E. Turkey. Geol. Soc. London Spec. Publ. 13, 225-265.
- Helvacı, C. ve Griffin, W. L., 1983b. Metamorphic feldspatization of metavolcanics and granitoids, Avnik Area, Turkey. Contr. Miner. Petrol. 83, 309-319.
- Mason, B., ve Moore, C. B., 1985, Grundzüge der Geochemie. Ferdinand Enke Verl., Stuttgart, 340 s.
- Ringwood, A. E., 1955, The principles governing trace element distribution during magmatic crystallization. Geochim. et Cosmochim. Acta 7 part I: The influence of electronegativity, 189-202.
- Rodionov, D. A., 1964, Distribution functions of the element and mineral content of igneous rocks. Schroll, E., 1976, Analytische Geochemie II'de: Enke Verl., Stuttgart, 374 s.
- Rösler, H. J. ve Lange, H., 1976, Geochemische Tabellen. Enke Verl., Stuttgart, 675 s.
- Scharbert, H. G., 1984, Einführung in die Petrologie und Geochemie der Magmatite I. Franz Deuticke Verl., Wien, 312 s.
- Schroll, E., 1976, Analytische Geochemie II. Enke Verl., Stuttgart, 374 s.
- Smirnov, S. I., 1963, Statistical distribution of the concentrations of elements in natural waters. Schroll, E., 1976, Analytische Geochemie II'de: Enke Verl., Stuttgart, 374 s.
- Taylor, S.R., 1964, Aundance of chemical elements in the continental crust: a new table. Mason, B. ve Moore, C. B., 1985. Grundzüge der Geochemie'de: Enke Verl., Stuttgart, 340 s.
- Wedepohl, K. H., 1956, Untersuchungen zur Geochemie des Bleis. Geochim. et Cosmochim. Acta 10, 69-148.
- Whittaker, E. ve Muntus, R., 1970, Ionic radii for use in geochemistry. Rösler, H. J. ve Lange, H., 1976, Geochemische Tabellen'de: Enke Verl., Stuttgart, 675 s.
- Young, E. Y., Myers, A. T., Munson, E., L., 1969, Mineralogy and geochemistry of fluorapatite from Cerro de Mercado, Durango/Mexico. US Geol Survey Prof. Paper 650-D, 84-93.