

PROSES MİNERALojİSİ: VERİ DEĞERLENDİRME VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ-BÖLÜM II

Process Mineralogy: Data Evaluation and Case Study Examples-Part II

Geliş (received) 31 Mart (March) 2009; Kabul (accepted) 20 Nisan (April) 2009

İlkay B. ÇELİK (*)
N. Metin CAN (**)

ÖZET

Bir proses mineralojisi çalışmasında, cevheri karakterize eden mineral bileşimi, tane boyu, serbestleşmesi ve elemental dağılım gibi veriler Bölüm I'de anlatılan modern teknoloji ekipmanları ile kolaylıkla elde edilebilmektedir. Bu veriler, karot incelemesiyle cevher yataklarındaki minerallerin karakterizasyonu ya da tesis performansının optimize edilmesi gibi tüm madencilik aşamalarından toplanabilir. Ancak bu verilerin, anlam ifade edecek şekilde bir araya getirilip sunulması prosesin doğru tanımlanabilmesi açısından çok önemlidir. Bu bölümde, elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanması ülkemizden ve dünyadan uygulamalı örneklerle anlatılmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Proses Mineralojisi, Serbestleşme, Modal Analiz, Verim, Tenör

ABSTRACT

In a process mineralogy study, the ore characteristics such as mineral composition, grain size, liberation and elemental distribution can be easily obtained by the modern technology equipment that were mentioned in Part I. These data can be gathered from the steps of all mining processes such as characterization of minerals in an ore deposit by examining the drilling cores or optimization of a plant performance. The presentation of these data which are meaningful in terms of the examined process is, however, very important for correct description of the process. In this part, the evaluation of obtained data and its interpretation are elucidated with the case studies from our country and the world.

Keywords: Process Mineralogy, Liberation, Modal Analysis, Recovery, Grade

(*) Dr., Hacettepe Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Maden Müh. Bölümü, Beytepe, ANKARA, ilkay@hacettepe.edu.tr

(**) Öğr. Gör. Dr. Hacettepe Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, ANKARA

1. GİRİŞ

Bölüm 1'de (Can ve Çelik, 2009) anlatıldığı üzere, modern otomatik görüntü analiz sistemleri ile çok sayıda mineral tanesi incelenerek oldukça detaylı ve güvenilir metalürjik veri üretilebilmektedir. Genel olarak bu veri türleri ile minerallerin modal, yapısal ve serbestleşme bilgileri nicel olarak belirlenebilmektedir. Modal bilgi, cevher içindeki mineral miktarlarını hacimsel ifade ederken, yapısal bilgi mineral tane büyüklüklerini ve yüzey alanlarını, serbestleşme bilgisi ise minerallerin tane kompozisyonu içindeki dağılımını içermektedir. Otomatik görüntü analiz sistemleriyle elde edilen veri türleri aşağıda sıralanmıştır:

- Modal mineraloji
- Elementel dağılım
- Mineral serbestleşmesi/kenetlenmesi
- Tane şekil özellikleri
- Mineral tane büyüklüğü dağılımı
- Hesaplanan kimyasal analiz
- Verim-tenör ilişkisi
- Mineral fazı özgül yüzey alanı (Jones, 1987).

Modal mineraloji bilgisi kimyasal analizin çoğu kez yetersiz kaldığı durumda oldukça önemlidir. Aynı elementleri içeren birden fazla mineral çeşidi aynı cevher içinde bulunabilir. Örneğin, bir bakır cevher yatağının olası oksitli ve sülfürlü bölgelerinde farklı bakır mineralleri görülebilir; ancak, kimyasal analizle belirlenen Cu içeriği aslında bütün bakır minerallerindeki toplam Cu miktarıdır. Oysa modal mineraloji bilgisi ile mineral çeşitleri ve cevher içindeki oranları belirlenebilir. Cevherin yapı/doku özelliklerine ait bilgi ise uygulanacak öğütme ve zenginleştirme işlemleri hakkında fikir verecektir. Mineral tane büyüklüğü, minerallerin birbirleri ile bağlanma durumları doğrudan kırma öğütme işlemlerinin aşamalarını ve zorluk derecesini belirlemektedir. Aynı cevher yatağında farklı mineralojik oluşumlar görülebilir. Dolayısıyla işletmeye alınan cevherin mineralojik yapısında zaman içerisinde değişimler olasıdır. Bu nedenle, yapısal bilgi cevherin mineral yatağındaki karakterizasyon aşamasında ne kadar önemliyse, cevher yatağının işletilmesi kararı verildikten sonraki tasarım, optimizasyon ve denetimi içeren tüm aşamalarda da o derece önemlidir (Sutherland, 1998).

Cevher zenginleştirmenin ön koşullarından biri

olan mineral serbestleşmesi ise genellikle iki boyutlu düzlemde, alan ya da çizgisel kesişim yöntemleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Serbestleşme derecesi, her cevher tanesinin mineral içeriğinin ölçülmesi ve tüm tanelerin o minerale göre içerikleri açısından serbestleşme sınıflarının oluşturulmasıyla hesaplanmaktadır. Çizelge 1'de bir mineralin serbestleşme sınıflarındaki dağılımı verilmektedir. Örneğin, sadece ilgili mineralden oluşan ve %100 serbest olarak adlandırılan tanelerin oranının %41,5, ikili veya çoklu bağlı tanelerdeki %60-70 oranında ilgili minerali içeren miktarın toplam mineral miktarına göre ise %2,5 olduğu görülmektedir (Petruk, 2000).

Çizelge 1. Bir Mineralin Serbestleşme Sınıflarındaki Dağılım Örneği (Petruk, 2000)

Serbestleşme sınıfı	Mineral miktarı (%)
0,1-10	6,5
10-20	3,5
20-30	1,5
30-40	1,0
40-50	1,0
50-60	1,0
60-70	2,5
70-80	6,5
80-90	11,5
90-99,9	23,5
100 (serbest)	41,5

Serbestleşme kriteri her zaman %100 kabul edilmeyebilir, cevherin oluşum yapısına göre bu değer %90-95 olarak da alınabilmektedir.

Bahsedilen bu temel ölçümler cevherin zenginleştirilmesi için en uygun koşulların ve işletme parametrelerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Elde edilen veriler sayesinde cevher karakterizasyonu, öğütme ve serbestleşme boyu, flotasyon davranımı, konsantre kirlenmesi ile artıktaki kaçak miktarı tahmin edilebilmektedir (Sutherland vd, 2000). Dolayısıyla, proses mineralojisi verileri ile hem tesisin hem de her bir ekipmanın ayrı ayrı metalürjik performansları değerlendirilebilmekte, uygun çalışma koşulları belirlenebilmektedir.

2. VERİ İŞLEME VE DEĞERLENDİRME

Proses mineralojisi verilerinin, cevher hazırlama tesislerinin metalürjik performanslarını doğru yansıtılabilmeleri için, öncelikle numune alma işleminin tesisin kararlı çalıştığı zaman aralığında, en az hata ile yapılması gereklidir. Ancak, özellikle tesislerde yapılan numune alma

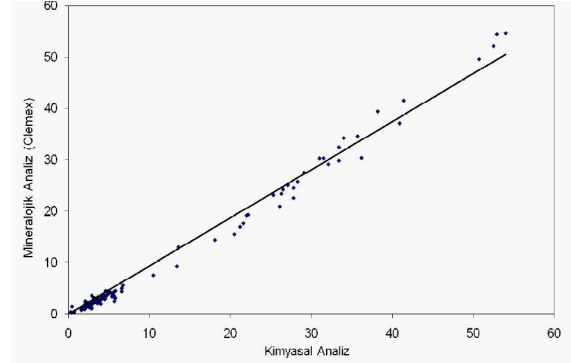
işleminde her ne kadar özenli çalışılsa da hata yapılması kaçınılmazdır. Yapılan hatalar sistemin çok dinamik olmasından, ölçüm cihazlarından, insan hatalarından ve/veya numune alma noktalarındaki fiziksel koşulların zorluğundan kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla numune alma sonrasında elde edilen verilerin güvenilir olması oldukça önemlidir. Bu amaçla ham verilerdeki hataların istatistiksel yöntemlere dayalı madde denkliği çalışmalarıyla düzeltilmesi gerekir. Bölüm l'de anlatılan proses mineralojisi çalışmasının aşamaları tamamlandıktan sonra elde edilen çok sayıda verinin prosesin işleyişini doğru yansıtabilecek şekilde bir araya getirilip sunulması bir sonraki aşamayı oluşturur. Veriler, çizelge ve grafikler halinde veri işleme programları ile hazırlanabileceği gibi MLA (Mineral Liberation Analyser), QEM*SCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy) sistemlerinde bu işlem kendi alt programlarında çok daha kolay yapılabilmektedir.

Tesis performansının değerlendirilmesi amacıyla, yapılacak proses mineraloji çalışmasında elde edilen verilerin kullanım aşamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Kritik akış kollarından alınan örneklerin fraksiyonel bazdaki kimyasal ve mineralojik analiz sonuçları uyumunun kontrol edilmesi,
2. Madde denkliği çalışmasıyla akış kollarına ilişkin katı tonajların belirlenmesi,
3. Fraksiyonel bazda belirlenen mineral/metallerin tonaj değerlerinin hesaplanması,
4. Tesis akım şemasında tekrar öğütme işlemi uygulanıyorsa, konsantre ve artık ürünlerinden geri hesaplama ile gerçek beslemenin belirlenmesi,
5. Tane boyuna bağlı olarak minerallerin serbestleşme derecelerinin belirlenmesi,
6. Serbest ve bağlı taneleri ifade eden serbestleşme sınıflarının fraksiyonel bazda gösterildiği modal analiz grafiklerinin çizilmesi.

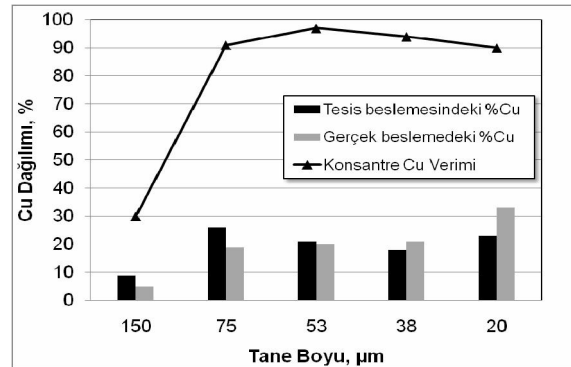
Fraksiyonel bazda yapılan mineralojik analiz sonucunda elde edilen verilerin öncelikle kimyasal analiz sonuçları ile uyumu kontrol edilmelidir. Örnek olarak Şekil 1'de, Clemex sistemiyle elde edilen veriler ile Atomik Absorbsiyon Spektrofotometresi kullanılarak yapılan kimyasal analiz sonuçları karşılaştırılmaktadır. Kimyasal analizle ölçülen Zn değerlerine karşılık, mineralojik analizle belirlenen sfalerit mineralinden Zn değeri stokiyometrik olarak hesaplanmıştır. Bu verilerin uyumu, kimyasal

analizle belirlenen elementlerin oluşturduğu minerallerin, mineralojik analizle doğru tanımlanıp tanımlanmadığını göstermektedir.



Şekil 1. Kimyasal-mineralojik analiz verilerinin uyumu

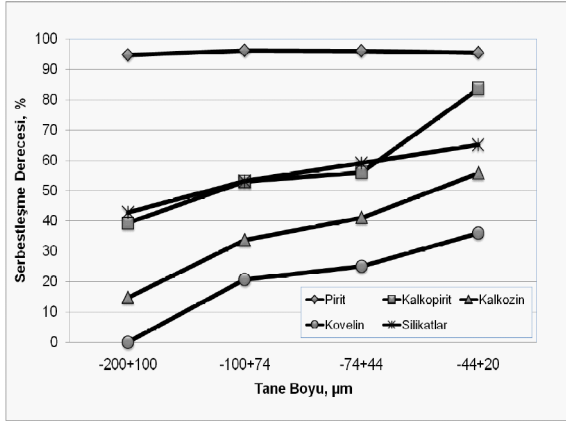
Mineralojik analizde hacimsel olarak ölçülen mineral/metal miktarlarının fraksiyonel bazda dağılımı hesaplanırken, o akış kolunun tane boyu dağılımı ve tonaj değeri dikkate alınmalıdır. Bu ilgili mineral/metalin hangi tane boyunda yoğunlaştığını göstermekte, öğütme boyu ve diğer işletme parametrelerine yönelik fikir vermektedir. Zenginleştirme için yeterli mineral serbestleşmesinin olmadığı durumlarda, ilgili akış kollarına tekrar öğütme işlemi uygulanmaktadır. Tekrar öğütme ile devredeki tane boyu dağılımı değiştiği için mineral dağılımı da tane boylarında farklı miktarlarda olacaktır. Devrede tekrar öğütme işleminin uygulandığı durumda, akış kollarındaki verim değeri fraksiyonel bazda hesaplanırken tesis besleme değeri kullanılmamalıdır. Konsantre ve artık ürünlerinin madde denkliği yapılmış akış değerleri kullanılarak geri hesaplama ile yeni besleme oluşturulmalıdır. Değerli mineral/metalin tesis ve gerçek beslemedeki dağılımı ile verimin bir arada gösterildiği bir örnek Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Bakır dağılımının tesis ve gerçek beslemedeki dağılımının karşılaştırılması.

Şekil 2'den Cu veriminin iri boyda oldukça düşük, ara ve ince boylarda daha yüksek olduğu, ancak Cu miktarının iri boyda az olması nedeniyle kaçağın ara ve ince boylardan kaynaklanabileceği görülmektedir. Tesis beslemesi ile hesaplanan gerçek besleme arasındaki fark devrede uygulanan tekrar öğütme işleminin etkisini göstermektedir.

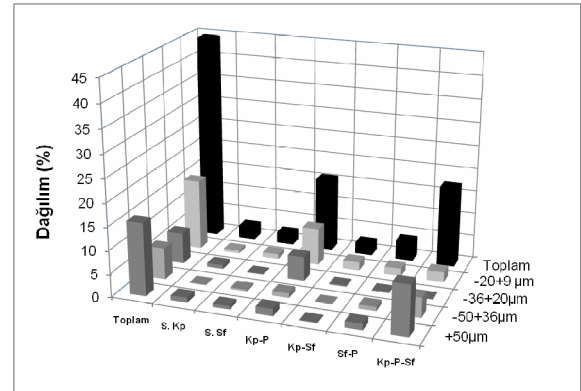
Değerli minerallerin ve gang minerallerinin serbestleşme derecelerinin hesaplanması zenginleştirme işlemlerinin performans değerlendirme ölçütlerinden biridir. Şekil 3'de serbestleşme grafiğinin çizimine yönelik bir örnek verilmekte, bir flotasyon konsantresinin fraksiyonel bazda içerdiği ana minerallerin serbestleşme dereceleri görülmektedir. Değerli minerallerin yanı sıra, gang minerallerinin de serbestleşme derecelerini bilmek oldukça önemlidir. Özellikle Şekil 3'de piritin tüm tane boyu fraksiyonlarında oldukça yüksek serbestleşme derecesine sahip olduğu görülmekte, bu da işletme koşullarında bir sorun olduğu yönünde ipuçları vermektedir.



Şekil 3. Fraksiyonel bazda mineral serbestleşme dereceleri.

Zenginleştirme prosesinin mineraloji açısından değerlendirmesi yapılırken, sadece minerallerin dağılımını ve serbestleşme derecelerini fraksiyonel bazda belirlemek yeterli değildir. Nihai konsantre ve artık ürünlerinin elde edilmesine kadar olan tüm zenginleştirme aşamalarında minerallerin serbest ya da diğer minerallerle ikili ve çoklu bağlı tanelerinin fraksiyonel bazda dağılımını belirlemek, hem tesisin genel metalurjisi hem de ekipmanların bireysel performansının değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Serbestleşme sınıflarının

tane boyu fraksiyonlarındaki gösterimi modal analiz grafikleri olarak adlandırılır. Serbestleşme sınıflarının fraksiyonel bazda miktarlarının belirlenmesinde, o fraksiyonların numune içindeki elek analizi ile hesaplanan miktarları dikkate alınarak hesaplama yapılmalıdır. Bu sayede herhangi bir serbestleşme sınıfının o akış koluna ait tonaj oranında yüzde dağılımı belirlenebilmektedir. Bu grafikler sayesinde artıkta değerli mineral/metalin hangi formda kaybedildiği ya da konsantredeki kirlenmeye hangi tane bileşimlerinin neden olduğu belirlenebilmektedir. Modal analiz grafik çizimine ilişkin bir örnek Şekil 4'de verilmiş olup, flotasyon nihai artığındaki serbestleşme sınıflarının fraksiyonel bazda yüzde dağılımı üç boyutlu grafik halinde gösterilmiştir. Bu grafikte, kaçağın formunu daha kolay belirleyebilmek için serbest pirit dışındaki minerallerin modal analizi verilmiştir. Bakır kaçağının -36+20 µm ve -20+9 µm fraksiyonlarında kalkopirit/pirit gibi ikili bağlı taneler ile, +50 µm ve -50+36 µm fraksiyonlarında ise üçlü bağlı taneler halinde olduğu görülmektedir. Artığa gelen iri tanelerin yavaş yüzen bağlı taneler olduğu grafikten görülmektedir.



Şekil 4. Flotasyon nihai artığına ilişkin modal analiz grafiği (S: serbest, Kp: kalkopirit, Sf: sfalerit, P: pirit).

Bazı durumlarda, bağlı taneler içindeki minerallerin dağılımını bilmek prosesin işleyişi açısından yeniden düzenlemeleri gerektirebilir. Örneğin, serbestleşme kriterinin %95 kabul edildiği bir cevherde %94 A, %6 B minerali içeren tane ikili bağlı tane olduğu gibi %55 A %45 B minerali içeren tane de ikili bağlı tane olarak sınıflandırılacaktır. Bağlı tane formları, özellikle serbestleşmeyi artırabilmek amacıyla tekrar öğütme işleminin uygulanması durumunda

önem kazanır. İlk durumda ek öğütme işlemi gerekmezken, ikincidurumda o akışkolunun tonajı da göz önünde bulundurularak tekrar öğütme işlemi gerekebilir. Çizelge 2, Clemex sistemi ile yapılan bir çalışmada sadece bir fraksiyon için ana minerallerin bağlı taneler içindeki dağılımını göstermektedir. Bu tür çizelgeler çalışılan tüm fraksiyonlar için hazırlanmalıdır.

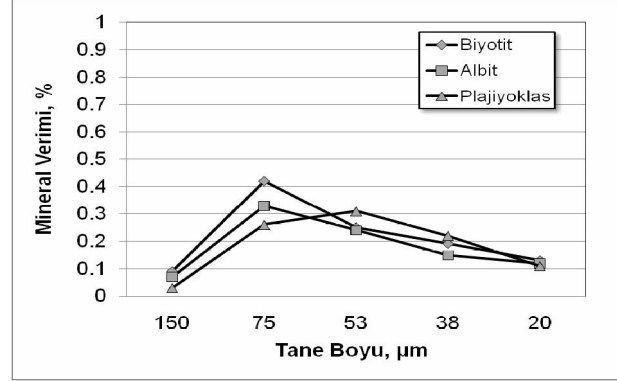
Çizelge 2. Bağlı Taneler İçindeki Mineral Dağılımları

	-50+36 µm		
	Kp	Sf	P
Kp-P	35.52	0.16	64.32
Kp-Sf	67.97	31.73	0.3
Sf-P	1.04	32.04	66.91
S. K	99.69	0.11	0.2
S. P	0.77	0	99.23
S. Sf	0.44	99.56	0
Kp-P-Sf	45.01	16.57	38.42

Değerli mineral/metalin proses boyunca davranımının belirlenmesinin yanı sıra, gang minerallerinin de konsantreye hangi mekanizma ile geldiğinin belirlenmesi gerekir. Buna göre gang mineralleri için de fraksiyonel bazda verim ve modal analiz grafikleri çizilir. Örneğin, flotasyon ile zenginleştirmede, proses/ekipmanın doğru işletildiği bir durumda, eğer gang minerali iri tane boyunda konsantrede kazanılıyorsa, bu tanelerin 'gerçek flotasyon' ile yüzdüğü söylenebilir. Diğer bir deyişle bu gang mineralleri ya değerli mineralle bağlı olduğu için yüzüyordur ya da serbest formdaysa aktive olup hidrofobik hale gelmiştir. Eğer konsantrede ince tane boyunda serbest gang mineralleri bulunuyorsa bu tanelerin suyla kazanım mekanizması ile taşındığı yorumu yapılabilir. Elde edilen bu sonuçlar aynı zamanda, ekipmanın çalışma parametreleri ile de ilişkilendirilebilmektedir. Örneğin, flotasyon hücresindeki köpük yüksekliğinin doğru ayarlanmaması ya da köpük sıyırma pedallarının palpın içinden sıyırma yapması da bu sonuçları doğurabilir. Şekil 5'te gang minerallerinin konsantredeki fraksiyonel bazda verim grafiği verilmektedir. Buna göre gang minerallerinin iri boyda verimi daha yüksek olmakta, eğrinin şekli itibarıyla minerallerin suyla kazanım yerine doğrudan yüzerek konsantreye taşındığı görülmektedir.

Bir sonraki aşamada çizilecek modal analiz grafikleri ile iri boydaki tanelerin serbestleşme

sınıfları belirlenmeli, bu tanelerin serbest ya da değerli mineralle bağlı olma durumlarına göre problemi çözecek uygun önlemlerin alınması gerekmektedir.



Şekil 5. Gang minerallerinin konsantredeki fraksiyonel verimleri (Sutherland, 2008).

Özellikle tesis performans değerlendirmesine yönelik yapılan proses mineralojisi çalışmasında, mevcut durum yukarıda anlatılan grafik ve tablo gösterimleri ile oldukça iyi tanımlanabilmektedir. Böyle bir çalışma sayesinde öğütme işlemi sonunda serbestleşmenin yeterliliği ya da zenginleştirmeyi iyileştirme amaçlı ek öğütme işlemine ihtiyaç olup olmadığı ortaya konabilmektedir. Zenginleştirme işlemlerinde ise, verimin ve kayıpların tanımlanması, konsantredeki kirlenme veya artıdaki kaçağın formunun belirlenmesi ve cevher yatağının işletildiği süre boyunca mineralojisindeki olası değişimlere göre tesis performansının ne şekilde etkileneceği tahmin edilebilmektedir. Ayrıca elde edilen veriler ile devredeki tüm bağlı ve serbest tanelerin akışını serbestleşme denkliği kurarak takip etmek ve bu farklı serbestleşme sınıflarının zenginleştirme işlemlerindeki davranımlarını ortaya koymak da mümkündür (Frew ve Davey, 1993).

3. UYGULAMA ÖRNEKLERİ

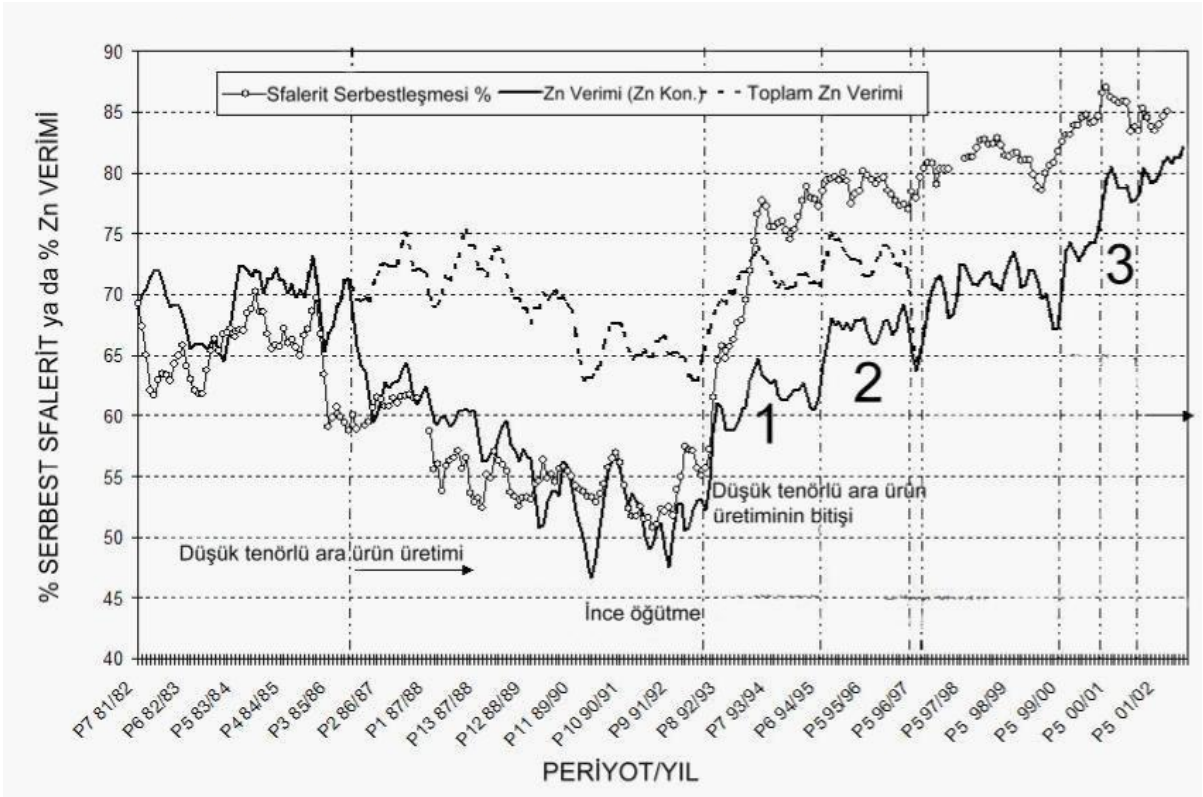
Bakır, çinko, kurşun cevherleri ile altın ve platin grubu minerallerin (PGM) işletilmesi sırasında karşılaşılan bazı zorlukların proses mineralojisi ile nasıl tanımlanıp çözümlendiğine ilişkin dünyadan ve Türkiye'den uygulama örnekleri bu kısımda anlatılmaktadır.

3.1. Örnek 1 (Pb/Zn Cevheri)

1980'li yıllarda, Mount Isa (Avustralya) Pb/Zn Konsantratörü performansının; tüvenan cevherin zaman içerisinde mineralojisindeki değişime bağlı olarak, yapı-dokunun çok daha ince taneli olması ve bünyesindeki doğal yüzeyliliği yüksek pirit miktarının artması nedeniyle oldukça önemli bir oranda düştüğü görülmüştür. Bu durumu düzeltilemek için serbestleşme ve işlem parametrelerinde bazı değişikliklerin gerekli olduğu düşünülmüş; yapılan değişikliklerin Zn verimine etkileri uzun dönemli olarak kaydedilmiştir. Tesis çalışma performansının uzun dönemli izlendiği bu örnekte kimyasal ve mineralojik analizler tane boyu bazında yapılmıştır. Şekil 6'da verilen grafikte, tesis performansını artırabilmek için düşük tenörlü ara ürün üretiminin yapıldığı görülmektedir. Ancak ara ürün üretiminin, ince taneli yapı-dokudaki cevherden sfaleritin serbestleşmesine yönelik bir çözüm getirmemesi üzerine daha ince öğütme alternatifleri üzerinde durulmuştur. Şekil 6'da, 1 no'lu bölge olarak gösterilen çalışma döneminde bilyalı ve kule değirmen tesiste çalıştırılmış, serbestleşmenin %20 artmasına rağmen

verimde sadece %5 kadar iyileşme olduğu görülmüştür. Verimde yeteri kadar iyileşme sağlanamamasına, çelik öğütücü ortamın ince tanelerin flotasyonunu olumsuz etkilemesinin neden olduğu belirlenmiştir. 1994 yılından sonra tesisin kendi geliştirdiği ve öğütücü ortam olarak genellikle kuvars kumunun kullanıldığı yatay karıştırmalı Isa değirmenler Pb devresine monte edilmiştir. Bu değirmenlerin yerleşiminden sonra tesis performansında görülen değişiklikler grafiğin 2 no'lu bölgesinde gösterilmekte, sfalerit serbestleşmesinin yanı sıra Pb konsantrasyonundan sfaleritin daha etkin uzaklaştırılması sonucunda verimde de %4 daha fazla iyileşme elde edildiği bildirilmektedir.

Ayrıca düşük tenörlü ara ürün üretimine de bu dönemde gerek kalmamıştır. Isa değirmenlerin Pb devresinde başarılı sonuçlar vermesi üzerine aynı değirmenlerden Zn devresine de yerleştirilmiş, bu değişiklik sonucu elde edilen verim ve serbestleşme artışları grafiğin 3 no'lu bölgesinde gösterilmiştir. Buna göre, serbestleşme %7, verim %10, konsantre tenörü ise %2 kadar artmış, çinkonun nihai konsantrasyonunda kazanımı yaklaşık %50'den %85'in üzerine çıkmıştır.



Şekil 6. Mount Isa tesisinde yapılan değişikliklerin sfalerit serbestleşmesi ve Zn verimine yansımalarının yıllar bazında izlenmesi (Young vd, 1997; Sutherland, 2008).

Serbestleşme sorununun çözümünün yanı sıra, kurşun ve çinkonun gang minerallerinden etkin bir şekilde ayrılma problemi de ele alınmış, yeni devre düzenlemeleri, su kimyasının daha iyi anlaşılması, reaktif ekleme düzeninin geliştirilmesi ve proses kontrolü sayesinde tesis daha kararlı verim-tenör değerlerine ulaşmıştır (Young vd, 1997; Sutherland, 2008). Uzun dönemli yapılan bu proses mineralojisi yaklaşımının, tesisteki sorunların belirlenmesi ve çözümüne yönelik ne kadar yararlı sonuçlarının olduğunu göstermesi açısından Mount Isa'daki bu örnek oldukça çarpıcıdır.

3.2. Örnek 2 (Skarn tipi cevher)

Bir tesisin ekonomik ömrü boyunca sürekli aynı mineralojiye sahip cevherle beslenmesi çoğu kez mümkün değildir. Beslemenin mineralojisinde olabilecek ufak bir değişim bile tesisin performansını oldukça etkileyebilir ve/veya ceza ödemelerine neden olabilir. Örneğin, porfiri bakır işleyen OK Tedi Madeninde zaman içerisinde skarn tipi cevher beslemesine geçilmesiyle konsantride florun arttığı ve florun izabe aşamasında gaz formuna geçip oldukça aşındırıcı özellikteki H_2SO_4 -HCl-HF asit karışımına dönüştüğü mikroprob analizi ile belirlenmiştir. Konsantrideki flor kaynağının, flotasyon besleme ve konsantride örneklerinin mineralojisinin incelenmesi sonucunda talk ve flogopit minerallerinden olduğu belirlenmiştir. Florun bu minerallerle konsantride taşınmasına sebep olarak da talkın doğal yüzeyliliğine bağlı olarak suyla kazanım mekanizmasıyla taşınmış olduğu bildirilmiştir (Pangum vd, 2001).

3.3. Örnek 3 (PGM ve altın)

PGM ya da altın gibi değerli minerallerin proses mineralojisi verileri, bu değerlerin olabildiğince yüksek verim ve tenörde kazanılabileceği zenginleştirme yöntemlerinin seçimine yön verebilmektedir. Örneğin, Greenland Skaergaard intrüzyonunun olduğu bir yataktan alınan numuneler üzerinde yapılan mineralojik incelemelerde, bu cevherin mineralojisine göre hangi zenginleştirme yönteminin uygun olacağı belirlenmiştir. Numunelerin hazırlanan dar tane boyu fraksiyonlarında taramalı elektron mikroskopu (SEM-Scanning Electron Microscopy) ile incelemeleri yapılmış, PGM

ve altının genellikle Cu sülfür mineralleri ile bağlı ya da serbest taneler halinde bulunduğu görülmüştür. Bu cevherin zenginleşmesi için sülfür flotasyonunun uygulanabileceği öngörülmüş, yüksek verimle yüksek tenörlü konsantrilerin alınmasının sülfürlü minerallerin büyük oranda serbestleşmesine bağlı olduğu kaydedilmiştir (Cabri vd, 2005).

Bakteriyel oksidasyonla altın kazanımının incelendiği diğer bir çalışmada ise, proses sırasında oluşan tüm mineral fazları ve dönüşümleri proses mineralojisi çalışmaları sonucunda belirlenmiştir. Çalışma sonucunda özellikle arsenopirit ve pirit içindeki ince boyda ve görünmez olarak nitelendirilen altının zenginleştirilmesi iyileştirilmiştir (Marquez vd, 2006). Bakteriyel oksidasyonun uygulandığı Brezilya'daki São Bento altın madeninde, numunelerin mineralojik karakterizasyonu X-ışınları difraksiyonu (XRD-X-Ray Diffraction), Fourier transform kızılötesi spektroskopisi (FTIR-Fourier Transform Infrared Spectroscopy), enerji dağıtım SEM ve mikroprob analizörü (EPMA-Electron Probe Micro Analyser) kullanılarak yapılmıştır. Analizler sonucunda cevher mineralojisine göre proses sırasında hangi fazların oluşacağı ve bu fazların çökme durumuna göre çevre için ne derece tehlikeli olabileceği, sistemde arseniği etkisiz duruma getirebilecek fazların bileşimi gibi prosesle ilgili bilgiler elde edilmiştir.

3.4. Örnek 4 (Kompleks sülfür cevheri)

Günde ~11000 ton Cu-Pb-Zn kompleks sülfürlü cevher işleyen Kanada'daki Brunswick konsantratöründe verim düşmesinin nedenlerini araştırmak üzere proses mineralojisi çalışması yürütülmüştür. Üretim, önce toplu flotasyonla Cu-Pb konsantrisi, daha sonra seçimli olarak Cu ve Pb ve toplu flotasyon artığından Zn konsantrilerinin alınması suretiyle yapılmaktadır. Ancak zamanla, Cu-Pb toplu konsantrisinde verimin oldukça düştüğü, sfalerit ve piritin konsantride geldiği gözlenmiştir. Sfalerit ve piritin, kalkopirit ve galenle bağlı olduğu düşünülerek ince öğütmenin sorunu çözeceği varsayımıyla beslemenin %80'inin geçtiği tane boyu 60 μ m'dan 45 μ m'a indirilmiştir. Ancak bu durum Cu-Pb seçimliliğini artırmamıştır. Bunun üzerine devre akış örnekleri üzerinde CANMET ile nicel mineralojik analiz çalışmaları yürütülmüş,

Cu-Pb devresinin konsantrisinde gerçekten sfalerit ve piritin kalkopirit ve galenle bağılı olup olmadığı araştırılmıştır. Konsantr örneklerinde sfaleritin %78 oranında, piritin ise %90 oranında serbest olarak bulunduğu, sanılanın aksine kalkopirit ve galenle bağılı olmadıkları görülmüştür. Dolayısıyla Cu-Pb devresindeki seçimlilik probleminin, yetersiz serbestleşmeye bağılı olmadığı, pirit ve sfaleritin tam olarak bastırılmamasının bir sonucu olduğu proses mineralojisi verileri sayesinde ortaya çıkmıştır. Bu bilgi sayesinde hem ince öğütme masrafı ortadan kalkmış hem de gerçek sorun çözümü kavuşturulmuştur (Lastra, 2007).

3.5. Örnek 5 (Cu-Zn cevheri-1)

Cu-Zn cevheri işleyen bir tesiste karşılaşılan seçimlilik problemine;

- beslemedeki bakır ve çinkonun tane büyüklüğündeki değişimlerine bağılı olarak yeterli serbestleşmenin sağlanamaması,
- sfalerit içinde kalkopirit hastalığı,
- sfaleritin aktivasyonuna neden olan ikincil bakır minerallerinin varlığı

gibi üç etkenin neden olduğu düşünülmüştür.

Bunun üzerine normal ve problemlili koşullarda alınan iki cevher tipi üzerinde yürütülen detaylı nicel mineralojik analizde (görüntü analizi), cevherde gerçekten kalkopirit hastalığının olduğu ancak, örnekleme döneminde alınan normal cevherde, problemlili cevhere göre daha çok bulunduğu görülmüştür. Dolayısıyla seçimliliği bozan asıl nedeninin sfaleritteki kalkopirit hastalığı olmadığı belirlenmiştir.

Cevherde, bakır ve çinkonun farklı tane büyüklüklerinde olsa bile belli bir inceliğe öğütüldüğünde, her iki tipteki cevher için de benzer serbestleşme dereceleri gösterdiği, problemin kaynağının yetersiz serbestleşme olmadığı ortaya çıkmıştır. Daha sonra normal ve problemlili cevher konsantrlerinde ikincil bakır minerallerinin varlığı araştırılmış, normal cevherde bu mineraller eser miktarda bulunurken problemlili cevherde miktarlarının daha fazla olduğu belirlenmiştir (Çizelge 3).

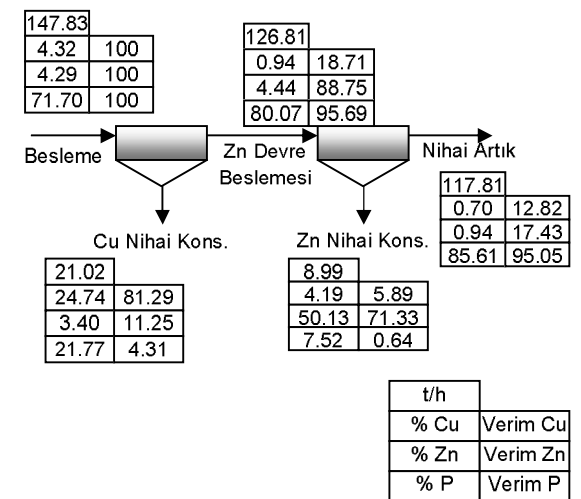
Çizelge 3. Minerallerin Serbestleşme Analizi (Kp: kalkopirit, S: serbest, Sf: sfalerit, İBM: ikincil bakır mineralleri, N: normal, P: problemlili)

%	Flotasyon besleme		Cu konsantr		Zn konsantr	
	N	P	N	P	N	P
Kp	1.9	1.1	74	74	3	11
S. Kp	53	47	83	84	17	57
Sf	5	1.1	9	19	85	75
S.Sf	74	67	67	67	82	93
İBM	Eser	0.2	-	4	-	0.5

Dolayısıyla ikincil bakır minerallerinin bir kısmı palta çözünerek sfaleriti canlandırmakta, bu da Cu-Zn seçimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Reaktiflerin daha kontrollü eklenmesi ile bu sorunun çözülebileceği görülmüştür (Lastra, 2007).

3.6. Örnek 6 (Cu-Zn cevheri-2)

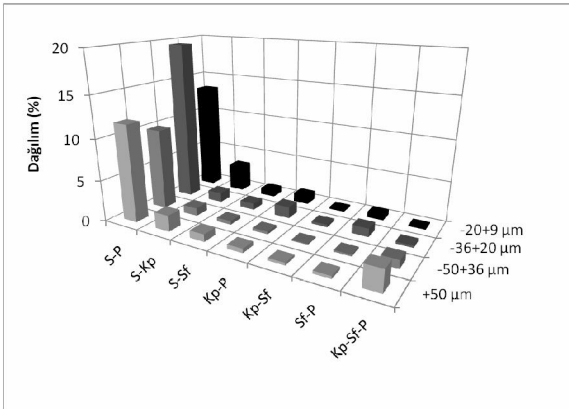
Proses mineralojisinin etkin bir şekilde kullanıldığı diğer çalışma Çayeli Bakır İşletmeleri'nde (ÇBİ) yürütülmüştür. Yıllık üretim kapasitesini artırmayı hedefleyen ÇBİ'nde, flotasyon tesisinin saatlik tonajı artırılarak yapılan örnekleme sonucunda tesis performansı değerlendirilmiştir. Cu ve Zn olmak üzere iki ayrı konsantrinin alındığı tesiste ana akışlar üzerinden yapılan madde denkleği sonunda tesisin genel performansı katı akışlar, verim, bakır, çinko ve pirit analizleri olarak Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Flotasyon devrelerinin genel performansı

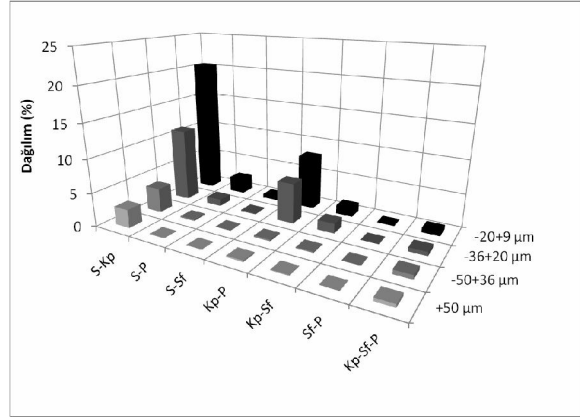
Şekil 7'den görüldüğü üzere, bakırın %18,71'i nihai artık ve çinko konsantresinde kaybedilirken, çinkonun da %11,25'i bakır konsantresinde kalmaktadır. Oluşan Cu ve Zn kayıplarının hangi fraksiyonlarda olduğunu belirlemek üzere, Şekil 2'dekine benzer tane boyu bazında verim grafikleri çizilmiştir. Buna göre, her ne kadar bakır konsantresinin verim ve tenör değerleri sırasıyla %81,29 ve %24,74 olsa da, verim değerleri +50 µm ve -50+36 µm fraksiyonlarında sırasıyla %29 ve %65'e düşmektedir. Dolayısıyla Zn devresine kaçan bakırın bu iki iri fraksiyonla kaybedildiği ortaya çıkmıştır. Cu devresinde kaybedilen %11,25 oranında Zn'nin 36 µm'dan daha ince fraksiyonlarda olduğu, nihai artıktaki ise Zn kaybının özellikle +50 µm ile -9 µm fraksiyonlarında olduğu belirlenmiştir. Kayıpların hangi formda (bağlı ya da serbest) olduğunu belirlemek için tüm akış kollarının fraksiyonel Clemex ve QEM*SCAN ile modal mineralojik analizleri yapılmıştır. Burada örnek olarak sadece besleme ve bakır nihai konsantre numunelerinin modal analiz grafikleri verilmektedir.

Beslemeye ilişkin modal analiz grafiğinde (Şekil 8) bu akış kolunun yaklaşık %55 kadar serbest piritten oluştuğu, kalkopiritin özellikle -36 µm fraksiyonlarında daha çok piritle bağlı olduğu ve üçlü bağlı tanelerin miktarının +50 µm ile -50+36 µm fraksiyonlarında daha fazla olduğu görülmektedir. Çizelge 2'deki gibi bağlı taneler içinde minerallerin dağılımı incelendiğinde, bu tanelerin daha çok pirit ve kalkopirit minerallerini içerdiği görülmüştür. Elde edilen verilerden, bakırın daha serbest formda kaba flotasyona beslenmesi gerektiği, bunun da ancak flotasyon beslemesinin daha ince öğütülmesi ile olacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 8. Flotasyon beslemesinin modal analizi.

Nihai bakır konsantresinin Şekil 9'da verilen modal analiz grafiğinde, konsantrenin kirlenmesine kalkopirit-pirit ve kalkopirit-sfalerit bağlı taneleri ile az miktarda serbest pirit ve serbest sfalerit tanelerinin neden olduğu görülmektedir. Kalkopirit-pirit bağlı tanelerinin miktarı özellikle -36+20 µm ve -20+9 µm fraksiyonlarında daha fazla olmakta, bu da beslemenin daha ince öğütülmesi gerekliliğine işaret etmektedir. Sfaleritin hem ince fraksiyonda serbest halde, hem de kalkopiritle bağlı taneler halinde bulunması bakır devresinde çinkonun hangi formda kaybedildiğini göstermektedir. Yine ince fraksiyonda pirit ve sfaleritin serbest tanelerinin bulunması, bunların büyük olasılıkla su ile taşınma mekanizması ile konsantreye geldiğini ifade etmekte, konsantrenin temizleme aşamasının daha etkin yapılması gerektiği sonucunu vermektedir (Ekmekçi vd, 2005).



Şekil 9. Bakır nihai konsantresinin modal analizi.

4. SONUÇLAR

Bircevherhazırlama prosesinin işleyişi, cevherdeki değerli ve gang minerallerinin serbestleşme durumuna göre değişmektedir. Fraksiyonel olarak yapılan proses mineralojisi çalışmasıyla serbest ve bağlı minerallerin davranımı prosesdeki tüm akış kollarında izlenebilmekte ve dolayısıyla o prosesin ya da ekipmanın performansı hakkında bilgi edinilebilmektedir. Tane boyu bazında elde edilen verilerin prosesi açıklayan uygun çizelge ve grafiklerle ifade edilmesi gerekmektedir. Verilerin bu şekilde sunumu ile proses hakkında aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilmektedir:

- Tesis genel performansının belirlenmesi,

- Ekipman performanslarının belirlenmesi,
- Verim ve kayıpların hangi tane boyunda ve serbestleşme sınıfında olduğunun belirlenmesi,
- Konsantreyi kirleten minerallerin hangi tane boyunda ve serbestleşme sınıfında olduğunun belirlenmesi,
- Minerallerin serbestleşme derecelerinin tayini ile öğütme işleminin performansı ve özellikle zenginleştirme aşamasında ek öğütmenin gerekli olup olmadığının belirlenmesi,
- Zenginleştirme işlemlerinin performansının belirlenmesi (Örneğin, flotasyonda eklenen kimyasalların ve flotasyon süresinin yeterliliği gibi),
- Tesis performansında cevher mineralojisine bağlı olası uzun dönemli değişimlerin belirlenmesi.

Nicel proses mineraloji analizi sayesinde problemlerin kaynağına ilişkin yorumlar daha kolay yapılabilenkte, elde edilen veriler tesisin işleyişi açısından yeni düzenlemelerin yapılmasında ya da kararların alınmasında önemli bir rol oynamaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, proses mineralojisi konusunda uzman olan Dr. David N. Sutherland'e bilgi ve tecrübe desteği için, Çayeli Bakır İşletmeleri'ne sağlamış oldukları teknik ve finansal destek için teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Cabri, L.J., Beattie, M., Rudashevsky, N.S. ve Rudashevsky, V.N., 2005; "Process Mineralogy of Au, Pd and Pt Ores from the Skaergaard Intrusion, Greenland, Using New Technology", *Minerals Engineering*, **18**, 887-897.

Can, N.M. ve Çelik, İ.B., 2009; "Proses Mineralojisi: Cevher Hazırlamadaki Önemi, Ölçüm Yöntem ve Araçları-Bölüm I", *Madencilik*, **48(1)**, 43-53.

Ekmekçi, Z., Can, M., Ergün, Ş.L., Gülsoy, Ö.Y., Benzer, H. ve Çelik, İ.B., 2005; "Performance Evaluation of ÇBİ Flotation Plant Using Mineralogical Analysis", *The 19th International Mining Congress and Fair of Turkey, İzmir*, 233-240.

Frew, J.A. ve Davey, K.J., 1993; "Effect of Liberation on Flotation Performance of a Complex Ore", *XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney*, 905-911.

Jones, M. P., 1987; "Applied Mineralogy-A Quantitative Approach", *Graham&Trotman, USA*, 259.

Lastra, R., 2007; "Seven Practical Application Cases of Liberation Analysis", *Int. J. Miner. Process.*, **84**, 337-347.

Márquez, M., Gaspar, J., Bessler, K.E. ve Magela, G., 2006; "Process Mineralogy of Bacterial Oxidized Gold Ore in São Bento Mine (Brasil)", *Hydrometallurgy*, **83**, 114-123.

Pangum, L.S., Glatthaar, J.W. ve Manlapig, E.V., 2001; "Process Mineralogy of Fluorosilicate Minerals in OK Tedi Ores", *Minerals Engineering*, **14 (12)**, 1619-1628.

Petruk, W., 2000; "Applied Mineralogy in the Mining Industry", *Elsevier, the Netherlands*, 268. Sutherland, D., 1998; "Applications of Quantitative Process Mineralogy through the Mining Cycle", *AusIMM Annual Conference: The Mining Cycle, Mt Isa, Qld*, 333-337.

Sutherland, D., Gottlieb, P. ve Butcher, A., 2000; "Mineral Characterisation in the 21st Century", *Proceedings 38th NMD&54th ATM-International Symposium on Minerals and Metals-Challenges beyond 2000, Bhilai, India, Indian Institute of Metals*, 1-9.

Sutherland, D., 2008, *Process Mineralogy Course Notes*.

Young, M.F., Pease, J.D., Johnson, N.W. ve Munro, P.D., 1997; "Developments in Milling Practice at the Lead/Zinc Concentrator of Mount Isa Mines Limited from 1990", <http://www.isamill.com/downloads/Developments%20in%20Milling%20Practice%20at%20the%20LeadZinc%20Concentrator.pdf>