

PROSES MİNERALojİSİ: CEVHER HAZIRLAMADAKİ ÖNEMİ, ÖLÇÜM YÖNTEM VE ARAÇLARI-BÖLÜM I

Process Mineralogy: Its Importance in Mineral Processing, Measuring Methods and Instruments-
Part I

Geliş (received) 09 Şubat (February) 2009; Kabul (accepted) 09 Mart (March) 2009

N. Metin CAN (*)
İlkay B. ÇELİK (**)

ÖZET

Proses mineralojisi, mineraloji bilgisinin uygulamalı olarak, cevher yatağının keşfinden tesis tasarımına kadar olan süreçte, tesis performansının değerlendirilmesinde ve üretim aşamasındaki problemlerin çözümünde kullanılmasıyla konvansiyonel mineralojiden farklılık gösterir. Bu yazıda, proses mineraloji bilgisinin madencilik ve cevher hazırlama süreçlerinde ne şekilde kullanılacağı ve cevher hazırlamadaki önemi örneklerle açıklanmıştır. Bir proses mineraloji çalışmasının yürütülmesinde izlenecek temel adımlar, analitik ekipmanlar ve bu ekipmanların günümüze kadar olan gelişimleri ile veri oluşturma yöntemleri tartışılmıştır. Ayrıca en modern ekipmanların uygulama alanlarına ilişkin örnekler sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Proses mineralojisi, görüntü analizi, serbestleşme, Clemex, QEM*SCAN, MLA

ABSTRACT

Process mineralogy differs from conventional mineralogy by using applied mineralogy knowledge in process of exploration of an ore deposit up to plant design, evaluation of plant performance and solving the problems in production stage. In this paper, it is elucidated that how process mineralogy knowledge can be used in mining and ore dressing stages and its importance in mineral processing by giving examples. The main steps which must be followed in a process mineralogy study, the analytical equipments and their development up to today and data processing methods are discussed. Also, some examples are presented relating to the application areas of the most modern equipments.

Keywords: Process mineralogy, image analysis, liberation, Clemex, QEM*SCAN, MLA

(*) Öğr. Gör. Dr. Hacettepe Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Böl., Beytepe, ANKARA, metin.can@hacettepe.edu.tr
(**) Dr. Hacettepe Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, ANKARA

1. GİRİŞ

Mineraloji (mineral bilimi), minerallerin bileşimini, yapı ve doku gibi fiziksel özelliklerini, kristalografisini ve oluşum süreçlerini inceler. Proses mineralojisi ise, özellikle tesislerin tasarımı, performans değerlendirme ve optimizasyonunda, çok detaylı nicel mineralojik veriler üretilerek, mineralojinin zenginleştirme süreçlerindeki etkisinin incelenmesidir. Genel olarak madencilik endüstrisindeki uygulamalı mineraloji yada diğer adıyla proses mineralojisi; mineraloji bilgisinin keşif ve madencilik aşamaları ile cevherlerin, konsantrelerin ve izabe ürünlerinin işlenmesi aşamasında karşılaşılabilecek problemlerin anlaşılması ve çözümü için kullanılması anlamına gelmektedir (Petruk, 2000).

Cevher hazırlama işlemlerinde temel amaç; yüksek verim ve tenör değerlerine sahip satılabilir nitelikte konsantre üretmek ve aynı zamanda değerli metal ya da mineral içeriği en aza indirilmiş olan artığı da olası çevresel etkileri göz önünde bulundurarak, en uygun şekilde bertaraf etmektir. Cevher hazırlama süreçlerinin performansı genellikle kimyasal analiz verileri ile değerlendirilmektedir. Ancak bu verilerle hesaplanan verim ya da tenör değerleri gerçek anlamda o sürecin verimliliği hakkında yeterli detayda fikir vermeyecektir. Örneğin; kalkopirit ve diğer ikincil bakır minerallerinin (kalkozin, bornit gibi) olduğu bir cevherde %30'luk bakır konsantrasyonunun %90 verimle elde edildiği bir durumda, bu değerlerin elde edilebilecek en iyi değerler olup olmadığına proses mineralojisi verileri olmadan karar vermek mümkün değildir. Çünkü kimyasal analiz verileri sadece analiz edilen bileşenin miktarını verirken minerallerin yapı, doku, serbestleşme durumu vs. gibi mineralojiye ilişkin bilgiler içermez. Oysa artığa kaçabilecek değerli metal/mineralin serbest ya da gangla bağlı olma durumu tesisin akım şemasında farklı düzenleme ve işletme koşullarını gerektirebilir. Bu anlamda, proses akış kollarındaki tanelerin mineralojik yapı dokuları ve serbestleşme durumlarını nicel olarak belirlemek, öğütme ve zenginleştirme devrelerinin en uygun koşullarda çalıştırılabilmesi için gerekli bilgileri sağlamaktadır. Bu nedenle proses mineralojisi verileri cevher hazırlama süreçlerinde oldukça büyük önem taşımaktadır.

2. PROSES MİNERALOJİ BİLGİSİNİN KULLANIMI

Cevher yatağını oluşturan değerli ve gang minerallerinin karakteristiklerini bilmek, yatağın araştırılması aşamasında olduğu kadar tesis tasarımı ve çalışma performansının değerlendirilmesi aşamalarında da oldukça önemlidir. Proses mineralojisi hem madencilik hem de cevher hazırlama süreçlerinde kullanılmakta ve cevher karakterizasyonunu temel alan iki farklı uygulamayı içermektedir:

1) Proses optimizasyonu ve tasarımı için mineralojik verilerin (serbestleşme, modal analiz gibi) tane boyu fraksiyonlarında belirlenmesi

2) Daha büyük kayaç parçaları, karot örnekleri ve ince kesitlerde cevher yatağı oluşumunun karakterize edilmesi (Benvie, 2007).

Bu temel uygulama alanları detaylandırılacak olursa, nicel anlamdaki proses mineraloji verileri aşağıda belirtilen aşamalarda kullanılmaktadır:

- Yeni bir cevher yatağının araştırma ve değerlendirilmesi aşamasında cevher mineralojisi, mineral tane büyüklükleri ve serbestleşmeleri ve cevher yapı dokusunun belirlenmesi (Bojcevski vd, 1998).

- Tesis tasarımı aşamasında cevher tipine ve serbestleşme boyuna bağlı olarak akım şemasının geliştirilmesi ve teorik verim tenör eğrilerinin oluşturulması (Sant'agostino vd, 2001; Morizot vd, 1997; Nice ve Brown, 1995).

- Tesis performansının iyileştirilmesi aşamasında değerli mineralin/metalin ürünlere dağılımı, artıktaki kaçak ile konsantredeki kirlenmenin belirlenmesi (Sutherland, 1998a).

- Tesis veriminin kararlı halde tutulması ve tesiste olabilecek değişimlerin etkisini kontrol edebilmek için periyodik olarak mineralojik denetlemenin yapılması (Sutherland, 1998a).

- Tesis artıklarının rehabilitasyonu veya başka proseslerde kullanılabilirliğinin belirlenmesi (Panov vd, 2000).

Proses mineraloji verileri cevher karakterizasyonu ve minerallerin serbestleşme durumunu içerir. Cevher örnekleri, içerdikleri mineral/metal

miktarlarına, metal davranımına, mineral tane büyüklüklerine, yapı doku özelliklerine ve mineral birlikteliklerine göre karakterize edilirler (Sutherland, 1998a). Bu özellikler, minerallerin serbestleşme durumlarının ve en uygun zenginleştirme yönteminin belirlenmesinde kullanılır. Örneğin minerallerin oluşum tane boyu gibi yapısal ve dokusal özellikleri mineralleri kazanma işleminin kolaylık derecesini ve dolayısıyla işlem maliyetini doğrudan etkileyen bir parametre olup en az cevher içindeki değerli mineral/metal miktarını bilmek kadar önem taşımaktadır. Farklı yapı-doku özelliği gösteren minerallerin miktarını bilmek prosesin devamındaki işlemlerin performansı ve ürün karakteristiğini tahmin etmek açısından da önemlidir (Donskoi vd, 2007). Mineral birlikteliklerini belirlemek ise, özellikle kompleks cevherler söz konusu olduğunda önem kazanmaktadır. Örneğin, konsantrenin toplu veya seçimli elde edilmesi konusunda bilgiler verecektir. Özellikle kompleks sülfürlü cevherlerin bünyelerinde proses ve/veya çevre üzerinde zararlı etkileri bilinen As, Sb, Hg, Cd gibi eser elementlerin yanı sıra prim getiren Au, Ag ve diğer bazı değerli metalleri de içerebildikleri bilinmektedir. Proses mineralojisi bu element ve metallerin ürünlerde ne oranda yoğunlaştıkları ve dolayısıyla flotasyon davranımlarının ne olacağı yönünde bilgi sağlayacaktır (Benzaazoua vd, 2002).

Minerallerin serbestleşme oranlarını belirlemek zenginleştirmedeki ayırımın etkinliği konusunda fikir verecektir. Benzer şekilde, prosesdeki kaçakların da yetersiz serbestleşmeden mi yoksa ayırma koşullarının uygun olmamasından mı kaynaklandığını açıkça ortaya koyacaktır. Örneğin bir flotasyon konsantresindeki kirlenmenin nedeni için öncelikle sorulması gereken en temel soru minerallerin yeteri kadar serbestleşip serbest olup olmadıkları ya da flotasyon koşullarının doğru olup olmadığıdır. Konsantredeki değerli mineralin gangla bağlı olması ya da serbest gang tanelerinin varlığı problemin kaynağı konusunda ipuçları vereceği için, yapılacak mineralojik ölçümlerle problem net bir şekilde belirlenebilir. Tesisteki akış kollarından alınan örneklerin serbestleşmelerinin ölçülmesiyle çok daha güvenilir tasarım ve optimizasyon kararları alınabileceği gibi ayrıca uzun dönemli tesis performansının da bu şekilde denetlenmesi mümkün olacaktır. Kimyasal analiz verileri sadece kazanılabilecek limit metal

miktarı hakkında bilgi vermektedir. Ancak metal davranımı denilen kavram, değerli metalin hangi mineraller içersinde olduğu, bu minerallerin seçilen yöntemle kazanılabilir formda olup olmadığı ve dolayısıyla prosesin veriminin ne olacağı konusunda detaylı bilgi içermektedir. Konuyu bir örnekle açıklamak gerekirse, Çizelge 1'de, A ve B olmak üzere 2 farklı cevher üzerinde yapılan kimyasal ve mineralojik analiz sonuçları verilmektedir. Kimyasal analiz sonucuna göre bakır dağılımı A ve B cevherlerinde sırasıyla % 1.1 ve 1.5'dir. Ancak mineralojik analiz sonucuna göre bakır, A cevherinde çoğunlukla bakır sülfür formunda bulunurken, B cevherinde bakır oksit bileşimi halindedir. Dolayısıyla cevherdeki değerli metalin kazanımına yönelik farklı proses koşullarının gerektiği ve bunu belirlemek için sadece kimyasal analiz sonucunun yeterli olmadığı bu örnekte açıkça görülmektedir.

Çizelge 1. Bir Bakır Cevheri İçindeki Farklı Minerallere Göre Elementel Dağılım (Sutherland, 1998b)

Mineral fazı	Bakırın Elemental Dağılımı, %	
	Cevher tipi	
	A	B
Kimyasal Analiz, Cu %	1.1	1.5
Kalkozin	18.8	16.3
Kovellit	10.5	1.7
Bornit	7.3	1.3
Kalkopirit	53.4	3.4
Bakır-Arsenik	3.2	0.0
Cu-Oksit/CO ₃	4.5	44.0
Cu-Fosfat	0.0	13.1
Cu-Silikat	0.0	12.3
CuFeMn-Silikat	0.0	0.4
Diğer Cu-Mineralleri	2.3	7.5

3. PROSES MİNERALOGİSİNİN AŞAMALARI

Sistematik bir proses mineraloji çalışmasının, bir tesisin performansını belirleme amacıyla yürütülmesi için izlenmesi gereken bazı adımlar mevcuttur. Bu aşamalar şematik olarak Şekil 1'de gösterilmektedir.

Tesis ve laboratuvar çalışmalarında yapılan tüm analizler cevher yatağını ya da akış tonajını temsil eden miktardaki örneklerle yürütülmektedir. Tesisteki üretim performansının

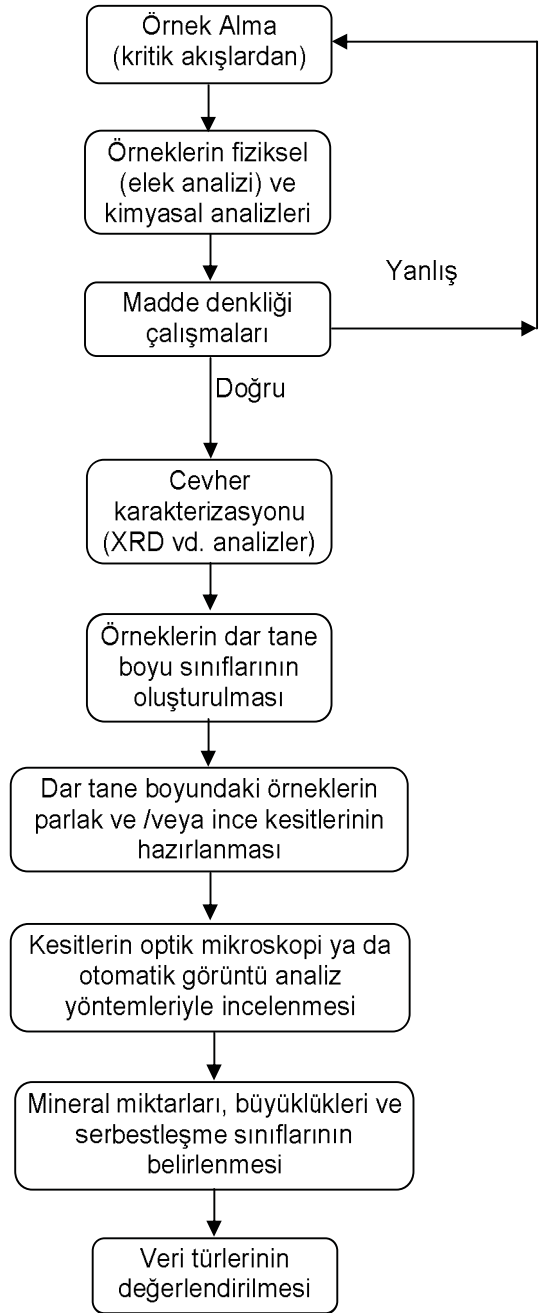
değerlendirilmesine yönelik önemli kararlar, büyük miktarlardaki akış kollarından alınan numunelerin azaltılarak daha küçük miktardaki örnekler üzerinde yürütülen ölçüm sonuçlarına göre alınmaktadır. Dolayısıyla alınan örnekler temsili ve doğru olmak zorundadır. Buna göre alınacak en az örnek miktarı çok iyi hesaplanmalı, örnek alma ekipmanlarının örnekleme noktasının koşullarına göre doğru tasarlanması gerekmektedir (Jones, 1987). Örneklemede yapılacak bir hata önyargılı sonuçların oluşmasına yol açacağı gibi, metalürjik denkliğin hatalı olması, cevher özelliklerinin iyi belirlenememesi gibi sonuçlar doğuracaktır (Holmes, 1998). Bu durumda yapılacak tek şey Şekil 1'de görüldüğü gibi örnek alma işlemini doğru olacak şekilde tekrarlamak olacaktır.

Akışlardan alınan temsili örneklerin kurutulup tartılması, elek analizlerinin yapılması ve madde denkliği çalışmalarının ardından, yapılacak olan XRD (X-ray diffraction) ve optik mikroskop analizleri, özellikle minerallerin daha iyi tanımlanması ve karakterize edilmesi açısından önemlidir. Detaylı mineralojik analiz için cevher örnekleri dar tane boyu fraksiyonlarında hazırlanmalıdır. Bunun nedeni, aynı akış için hem dar tane boyu aralıklarında serbestleşme analizini doğru ve kolay yapabilmek, hem de farklı yoğunluklara sahip mineraller içeren cevher örneklerinde tane boyu farklılığından kaynaklanabilecek etkileri ortadan kaldırmaktır.

Hazırlanan dar tane boyu fraksiyonlarında, seçilen bir görüntü analiz sistemi ile aşağıdaki parametreler belirlenebilir:

- Minerallerin miktarları
- Minerallerin tane büyüklükleri ve şekil özellikleri
- Serbestleşme sınıfları
- Serbestleşme sınıfları içindeki mineral miktarları
- Metallerin mineraller içindeki dağılımı

Bu parametreler ile elementel dağılım, ürünlerin mineral bileşimi, teorik ve pratik verim-tenör eğrileri, mineral kayıpları ile tane serbestleşmesi bilgileri elde edilmektedir.



Şekil 1. Proses mineraloji çalışmasının aşamaları.

Bu verilerin çizelge ve grafiklerle ne şekilde ifade edileceği ve prosesin işleyişi açısından nasıl yorumlanması gerektiği bir sonraki maddede detaylı olarak dünyadan örneklerle anlatılacaktır.

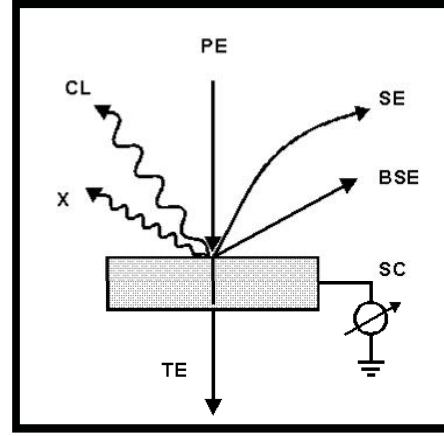
4. PROSES MİNERALOGİSİNDE KULLANILAN EKİPMANLAR

Proses mineralojisinde kullanılan ekipmanlar basitçe aşağıdaki gibi gruplandırılabilir:

- Optik mikroskop
- XRD
- Elektron ışın demeti ekipmanları (ikincil elektronlar, geriye saçılmış elektronlar, x-ışını floresansı)
- Otomasyonlu sistemler

Optik mikroskoplar, minerallerin tanımlanması, miktarlarının tane sayım yöntemiyle belirlenmesi amacıyla kullanılan en bilinen ve ucuz ekipmandır. XRD'lerin gelişimiyle, toz numuneler üzerinde mineral kristal yapılarının ve hatta polimorfik kristallerin ayırt edilebildiği ancak, mineral miktarlarının nitel olarak belirlendiği analizler mümkün olmuştur. Elektron mikro problemlerin (EPMA-Electron Microprobes Analyzers) gelişimi mineralojide dev bir adım olmuş; minerallerdeki ana, tali ve eser elementlerin miktarları parlatma ve ince kesitlerden belirlenebilmiştir. Her ne kadar taramalı elektron mikroskobu (SEM-Scanning Electron Microscopy) EPMA'lardan önce gelişmişse de, ikincil elektron (SE-Secondary Electron) görüntülerindeki bazı özelliklerin mineralleri tanımlayamaması nedeniyle mineralojiye girişi bir süre gecikmiştir. Enerji dağıtım (EDS-Energy Dispersive) X-ışını analizörlerinin gelişimiyle SEM görüntüsünden mineral tanelerinin tanımlanması, zamanla SEM'in de proses mineralojide kullanılmasını sağlamıştır. 1960-1985 arasındaki dönem yeni ekipmanların gelişimi açısından oldukça önemli bir dönem olup görüntü analizörü (IA-Image Analyser), proton indüksiyonlu X-ışını analizörü (PIXE-Proton Induced X-Ray Analyser), ikincil iyon kütle spektrometresi (SIMS-Secondary Ion Mass Spectrometer) ve lazer iyonizasyonlu kütle spektrometresi (LIMS-Laser Ionization Mass Spectrometer) gibi ekipmanlar uygulamalarda kullanılmıştır (Petruk, 2000). Elektron ışın demeti bazlı sistemlerde kullanılan sinyal çeşitleri Şekil 2'de gösterilmektedir. İkincil elektronlar numunenin yüzey tabakasından yansıyan ışınlar olup yüzey topoğrafyası hakkında bilgi vermekle birlikte parlak kesitler için uygun olmamaktadır. Geriye saçılmış elektronlar ise yine yüzeyden yansımakta, bu sinyalin şiddeti elektron ışın demeti altında numunenin ortalama atomik numarasına bağlı olarak değişmektedir. X-ışınları

floresansı genelde noktasal kimyasal analiz için kullanılmakta olup X-ışını demeti altında numunenin X-ışını spektrasını vermektedir.



- PE (Primary Electrons): Birincil elektronlar (ışın demeti)
SE: İkincil elektronlar
BSE (Back Scattered Electrons): Geriye saçılmış elektronlar
X: X-ışınları
SC (Specimen Current): Örneğin akımı
CL (Cathodo Luminescence): Katodo luminesans
TE (Transmitted Electrons): İletilen elektronlar

Şekil 2. Elektron ışın demeti sistemlerinde kullanılan sinyal çeşitleri.

Bu sistemlerde enerji dağıtım (EDS) ve dalga boyu dağıtım (WDS-Wavelength Dispersive) olmak üzere iki tip X-ışını dedektörü kullanılmaktadır. EDS ile bütün elementler aynı anda analiz edilirken, WDS dedektörü ile tek bir element belli bir zaman süresince analiz edilmekte, bu nedenle yavaş ancak doğruluk payı daha yüksek bir yöntem olmaktadır. Elektron ışın demeti sistemlerinde, optik sistemlerde olduğu gibi örnek hazırlama işlemi parlak kesit dayalı olup, kesit yüzeyinin karbonla kaplanması nedeniyle parlatma kalitesine daha az duyarlıdır. Uygulanan elektron demeti örnek yüzeyine uygulama süresince hasar verebilmektedir.

Elektron ışın demeti sistemlerinden biri olan SEM'in, optik mikroskoba oranla geriye saçılmış elektron (BSE) parlaklığı ve X-ışını bilgilerini kullanarak çok çeşitli mineral fazlarının ortalama atomik numaralarını ve kimyasal kompozisyonlarını belirleme gibi çok büyük avantajları mevcuttur (Sutherland vd, 2000). Elektron problemleri ise nicel veri sağlamakta, WDS kullanımı ile eser elementlerin de analizini

kolaylaştırmaktadır. Bu amaçla ilk geliştirilen sistemlerden biri CANMET'te (Kanada) olup bir EDS, dört WDS ve bir adet SDC'den (silicon drift chamber detector) oluşan üç farklı X-ışını dedektörleriyle 1984'den beri kullanılmaktadır. Bu sistem EPMA bazlı olup yüksek kararlılıkta elektron ışın demeti uygulayarak minerallerin BSE görüntülerinden ayırım yapar. Ancak ihtiyaç duyulduğunda diğer dedektörlerden de bilgi sağlayabilmektedir. BSE çalışma koşulunda saatte ~100000 tane işlenebilmekte iken X-ışını yönteminde bu rakam ~20000'e düşmektedir. Her ne kadar ticari olarak pazarlanmasa da günümüzde kullanılan en hızlı yöntemlerden biri olduğu iddia edilmektedir (Lastra, 2007).

Otomatik sistemlerin geliştirilmesine duyulan ihtiyaç, optik mikroskop ile istatistiksel anlamda önemli bir veri setinin sağlanmasının zor olmasından dolayıdır. Optik mikroskop ile yeterli sayıda mineral tanesinin sayılmasının oldukça emek yoğun bir işlem olması ve elde edilen sonuçların kullanıcıya göre değişkenlik göstermesi nedeniyle bir standarta uymamaktadır (Fandrich, 2007). Optik mikroskop kullanılarak minerallerin renklerine göre yapılan otomatik görüntü analizi, bazı optik özelliklerin (renk gibi) çakışması, refleksiyonun parlatma kalitesine bağlı olması ve opak olmayan minerallerin epoksi reçineden ayırt edilememesi gibi nedenlerle bazı durumlarda mümkün olmamaktadır (Lane vd, 2008). Böyle durumlarda taramalı elektron mikroskoplarla donatılmış enerji dağıtımlı (EDS-SEM) otomatik elektron ışın demeti sistemlerinde daha ayrıntılı ve doğru bilgi elde edilebilmektedir. Optik mikroskop destekli otomatik görüntü analiz sistemlerine örnek olarak Kanada menşeli Clemex yazılımı gösterilebilir. EDS-SEM sistemlerine örnek olarak ise son yıllarda madencilik endüstrisinde büyük bir doğruluk payıyla yer edinen Intellection Pty. Ltd. 'in geliştirdiği QEM*SCAN (Anon(a), 2008) ile JK Tech Pty. Ltd.'in geliştirdiği MLA (Anon(b), 2008) sistemleri örnek gösterilebilir. Ticari olarak pazarlanan bu sistemlerin çok çeşitli metalik cevherler ve hatta kömür üzerinde oldukça başarılı uygulamaları bulunmaktadır.

4.1. Clemex Vision (Otomatik Görüntü Analiz Cihazı)

Görüntü analizi, örneklerden elde edilen mineral resimlerinin sayısallaştırılması olarak tanımlanabilir. Clemex Vision PE (Şekil 3), optik

mikroskop, otomatik analizi sağlayan motorize cihaz ve görüntü analiz yazılım programından oluşmaktadır. Yazılım programının kullanımı kolay olup görüntüyü sayısallaştırabilecek uygun makro geliştirilmesine imkân tanımaktadır.



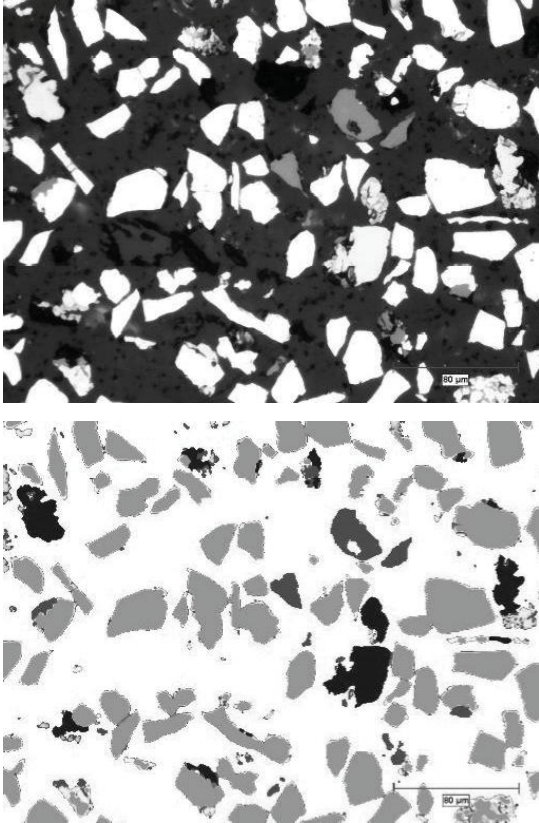
Şekil 3. Clemex otomatik görüntü analiz sistemi.

Bu yöntemde görüntü analizi dört temel aşamada gerçekleşmektedir:

1. Görüntünün elde edilmesi (CCD kamera)
2. Görüntüdeki nesnelerin ayırt edilmesi (eşiklendirme, filtreleme)
3. Ölçümler (yazılım ve donanım algoritmaları)
4. Sonuç raporları (çıktı, bellekte kaydetme gibi)

Görüntünün kamera yardımıyla elde edilmesinden sonra tanelerin ayırt edilmesi gri ve renkli olmak üzere iki farklı eşiklendirme işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Görüntü mikrometre ile kalibre edildikten sonra çok küçük karelerden oluşan bir karelağ ağına dönüştürülür ve her bir kareye dijital bir değeri olan piksel adı verilir. Gri eşiklendirme, genellikle beyazdan siyaha geçiş gri renk tonlarını içeren görüntülerde uygulanır ve görüntünün parlaklık şiddetine göre işlem yapılır. Buna göre görüntüdeki her pikselin 0-255 arası (0: siyah, 255: beyaz) bir grilik değeri vardır. Parlak kesitlerden görüntünün elde edilmesinin ardından o görüntüyü en iyi şekilde tanımlayabilecek bir algoritma yazılır. Algoritma, görüntü üzerinde yapılan mineral tanımlama, ölçme gibi işlemlerin belli bir sırayla yer aldığı komutlardan oluşmaktadır. Amaç, minerallerin yapı-dokusunu en doğru şekilde sayısallaştırmak ve anlamlı ölçümler alabilmektir. Görüntüyü tanımlayan algoritma hazırlandıktan sonra görüntüde yer alan farklı mineraller renk farklılıklarına göre eşiklendirilir. Her farklı mineral eşiklendirme ile farklı renk düzlemlerinde tanımlandıktan sonra doğru ölçüm alabilmek için bazı filtreler kullanılarak görüntü temizleme işlemi

yapılır. Otomatik motorize cihaz yardımıyla parlak kesit üzerindeki birçok alanda ölçümler tekrarlı yapılabilmekte, on binlerce tane bir saatten daha kısa bir sürede analiz edilebilmektedir (Clemex, 2001). Analiz, mineral tane boyunun 500-20 µm aralığı için kolaylıkla yapılırken, 10 µm'dan daha ince taneler için hassasiyet bozulmaktadır. Şekil 4'deki üst resimde flotasyon beslemesinin -36+20 µm fraksiyonuna ait bir görüntü verilmekte, alttaki resimde ise bu görüntünün eşiklendirme prensibine göre minerallerin farklı renk düzlemlerinde tanımlanmış halleri görülmektedir. Buna göre orijinal görüntüde beyaz taneler piriti, açık gri ler kalkopiriti, koyu gri tonundakiler ise sfaleriti temsil etmekte, alttaki görüntüde sırasıyla bu mineraller gri, siyah ve koyu gri renklerle ifade edilmektedir. Eşiklendirmeden sonra istenilen tüm ölçümler kolaylıkla yapılabilmektedir.



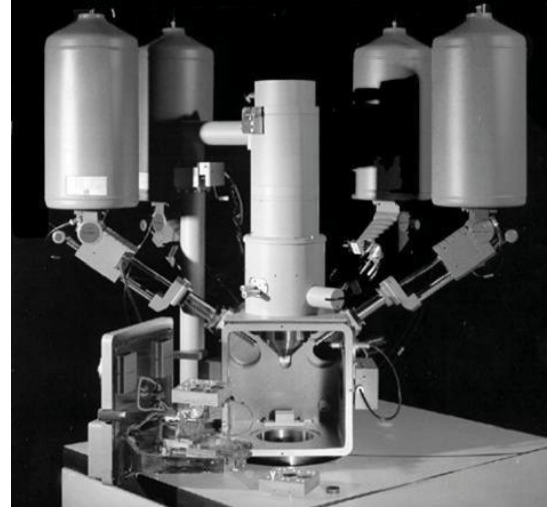
Şekil 4. Clemex sisteminde minerallerin tanımlanması.

Clemex sistemi kullanılarak kompleks sülfürlü cevherlerin (Ekmekçi vd, 2005), demir cevherinin ve hatta klinker minerallerinin (Çelik ve Öner, 2006; Çelik vd, 2007) analiz uygulamaları başarı ile yapılmıştır. Sistemin oldukça kısa sürede çok sayıda tane analiz etme ve yazılımın kullanım

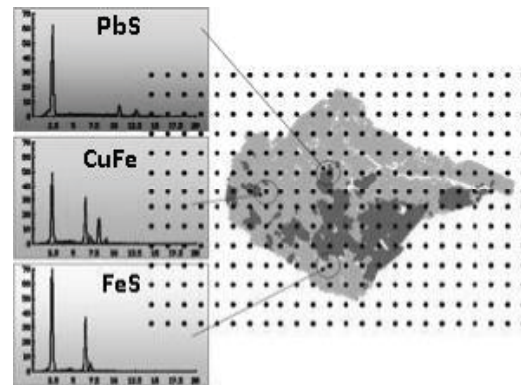
kolaylığı olmasına rağmen, özellikle silikat gibi opak olmayan minerallerin parlak kesitte epoksi reçine ile aynı renkte olması eşiklendirme işlemini zorlaştırmaktadır. Ancak, bu sorunun son yıllarda sistemin renk ayırımını esas alan daha iyi çözünürlükteki kamera ve yazılımın yeni sürümü ile çözülebildiği rapor edilmektedir. 1990 yılından beri pazarlanan Clemex sistemi 20'den fazla ülkede kullanılmaktadır (Anon (c), 2008).

4.2. QEM*SCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy)

QEM*SCAN (Şekil 5) sisteminde EDS X-ışını sinyalleriyle taneler nokta nokta haritalanmakta (Şekil 6), işlemi hızlandırabilmek için simetrik yerleştirilmiş 4 dedektörle çalışılmaktadır.



Şekil 5. QEM*SCAN sistemi



Şekil 6. QEM*SCAN ile mineralojik tanımlama.

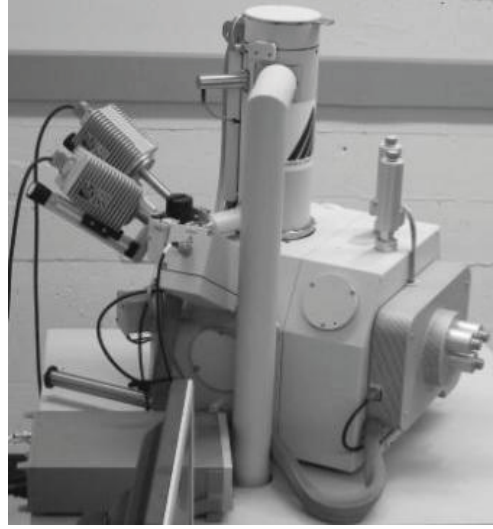
QEM*SCAN sisteminde X-ışını spektrasi kullanılarak her nokta piksel dedektörlerle 10 milisaniye gibi çok kısa bir sürede analiz edilmekte, mineral fazları içerdikleri elementlerin oranına ve geriye saçılmış elektronların şiddetine göre sınıflandırılmaktadır. Bir elementin varlığı o elemente ilişkin X-ışını spektrisindeki karakteristik piki ile belirlenmektedir. Nicel EDS analizi sayesinde de mevcut elementlerin miktarı hesaplanmakta, her noktanın analizi sonucunda elde edilen bilgi QEM*SCAN'ın geniş mineral veri tabanı ile karşılaştırılmaktadır. QEM*SCAN sisteminde analizin noktasal, çizgisel ve alansal tarama şeklinde yapılabildiği farklı çalışma biçimleri mevcuttur (Sutherland ve Gottlieb, 1991; Sutherland vd, 2000). Özellikle alansal taramada bir kaç mm'lik taneler analiz edilebilirken, hassasiyetin azaldığı alt tane boyu sınırının yaklaşık 8-10 µm olduğu söylenebilir.

Özellikle silikat grubu gibi tanımlanması zor olan minerallerin analizinde QEM*SCAN oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. QEM*SCAN sisteminin çeşitli cevher yataklarındaki serbestleşme analizini içeren oldukça geniş aralıktaki değerli metallerin prosesinde (Sutherland ve Fandrich, 1996) olduğu kadar kömür endüstrisinde de (Lui vd, 2005) uygulamaları mevcuttur. Örneğin, altın içinin uygulandığı bir tesiste, kireç tüketiminin artışı ile proses veriminin bozulmasının nedenleri tesisteki akış kollarından alınan örneklerin QEM*SCAN ile mineralojik incelemesi sonucunda bulunmuştur. Buna göre, demir sülfat ve kil minerallerinin özellikle -10 µm fraksiyonunda yoğun bir şekilde çözünmesinin kireç tüketiminin artmasına neden olduğu belirlenmiştir (Latti vd, 2001).

QEM*SCAN sisteminin metalik cevherlerden oldukça farklı ve karmaşık karakteristiklere sahip kimberlitler üzerinde de uygulaması bulunmaktadır. Bu karmaşıklığa neden olan; kimberlitlerin temel olarak iri tane boyundaki cevherin içinde ince taneli ve çoğunlukla silikat bazlı mineralojiye sahip olması ve oldukça düşük oranda elmas (ekonomik sayılan kimberlitlerinde bile ~0.2 ppm) içermesidir. QEM*SCAN sistemi ile elmas için önemli bir ölçüt olan serbestleşme derecesi ve tenör daha kolay belirlenebilir hale gelmiştir (Benvie, 2007). 1985 yılından beri ticari olarak pazarlanan QEM*SCAN'ın, dünyada on biri farklı ülkede olmak üzere 60'a yakın kurulu sistemi kullanılmaktadır (Anon (a), 2008).

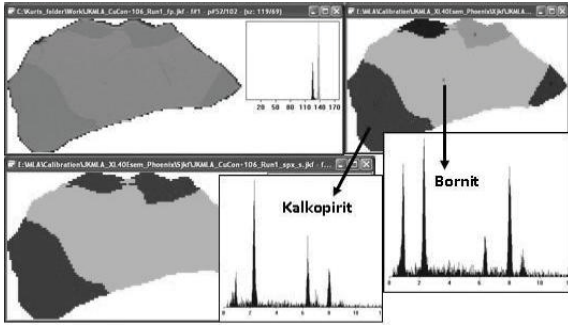
4.3. MLA (Mineral Liberation Analyser)

MLA sisteminde (Şekil 7) çoğunlukla BSE görüntüsü ve X-ışını spektrasi birlikte kullanılarak yüksek çözünürlük ve hızda otomatik nicel mineral tanımlama işlemi yapılabilmektedir. QEM*SCAN'den farklı olarak genellikle BSE görüntüsünden analiz yapıldığı için işlem daha hızlı olmakta, dolayısıyla daha çok tane analiz edilebilmektedir. Ancak tanımlanması zor olan mineraller için X-ışını analizi kullanıldığında işlemin hızı yavaşlamaktadır (Sutherland, 2008).



Şekil 7. MLA sistemi.

CANMET'teki sistem gibi BSE ve EDS kombinasyonu ile mineralleri birbirinden ayıran MLA sisteminde QEM*SCAN'den farklı olarak de-aglomerasyon fonksiyonu bulunmaktadır. Bu özellik sayesinde tanelerin birbirine teması engellenmekte ve daha doğru sonuçlar alınabilmektedir. Birbirine temas eden tane ayırımı gerçekleştirildikten sonra tane sınırlarını doğru bir şekilde belirlemeye yarayan BSE görüntüsü ile eşiklendirme işlemi yapılır. Analiz edilen her tane içindeki ortalama BSE grilik değeri o tane içindeki minerallerin ortalama atomik numarası ile eşdeğerdir. Ortalama atomik numara değeri ise mineral tarafından yayılan geriye saçılmış elektronların sayısı ile ifade edilmekte, bu da BSE görüntüsündeki gri renk seviyesi ile doğru orantılı değişmektedir (Şekil 8). MLA, BSE görüntüsünün yanı sıra noktasal, alansal ve haritalama gibi 3 farklı X-ışını analiz tekniğini de kullanarak mineralleri tanımlamaktadır (Anon (b), 2008).



Şekil 8. Farklı minerallerden oluşan bir tanede MLA X-ışını analiz tekniği.

MLA, farklı yapı doku özelliği gösteren cevher minerallerinin tanımlanmasına yönelik birçok ölçümyöntemini içinde barındırmaktadır. Örneğin, artıkların ya da platin grubu elementler gibi düşük tenörlü cevherlerin tanımlanmasında seyrek faz analiz yöntemi kullanılırken, altın gibi geniş tane toplulukları arasında bulunan çok ince boyuttaki elementlerin analizinde ise nadir bulunan faz analiz yöntemi tercih edilmektedir (Fandrich vd, 2007). Ancak yine de analiz hassasiyeti 10 µm'dan daha ince taneler için azalmaktadır. Analiz için tane boyu aralığının 10 µm-1mm arasında olması ve örneklerin dar fraksiyonda hazırlanması tercih edilmektedir. MLA'deki veri sunumu QEM*SCAN ile karşılaştırıldığında daha basit metalurjik tablo ve grafikler halindedir.

Dünyada 13 farklı ülkede 59 adet kurulu MLA sistemi mevcut olup, bunlarda sadece 13'ü Güney Afrika Cumhuriyeti'nde yer alan Anglo Platinum Limited'da bulunmaktadır (Anon (b), 2008). Türkiye'de de Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) bünyesinde, 2008 yılında MLA faaliyete geçmiştir.

Günümüzde otomatik görüntü analiz sistemlerinin özellikle değerli metallerin analizinde pek çok fayda sağladığı görülmekte, hatta fiziksel olarak bağlı haldeki görünebilir altının yansıma katı çözelti formundaki kolay ayırt edilemeyen altının bile bu sistemlerle kısa sürede ve doğru olarak analiz edildiği belirtilmektedir (Goodall ve Scales, 2007).

5. SONUÇ

Cevher mineralojisinin nicel olarak karakterize edilmesi tesis tasarımı, üretim aşamasındaki bir problemin tanımlanması ve çözümü, performans

değerlendirme ve denetleme süreçlerinde önemli kararların alınmasını kolaylaştırmaktadır. Nicel verilerden kasıt, cevheri oluşturan minerallerin miktarları, tane büyüklükleri, serbestleşme durumları, tane kompozisyonları, şekil ve yapı/ doku özellikleridir. Bu verileri sağlayan proses mineralojisi çalışmalarında, izlenmesi gereken yöntemler ve kullanılan son teknoloji ekipmanlar giderek daha önem kazanmaktadır. Üretim yapılan cevher yatağındaki değişimin her aşamada takip edilmesi ve bu değişime bağlı olarak tesis performansındaki değişimlerin belirlenmesi proses mineraloji verilerinin sistematik olarak toplanmasıyla mümkün olmaktadır. Dolayısıyla günümüzde pek çok tesiste tüvenan cevher ve kritik akış kollarından alınan örneklerin mineralojik analizleri yapılarak veri tabanı oluşturulmaktadır.

Son 25 yıl içerisinde kullanılan ekipmanlar hızla gelişim göstermiş, otomasyona ağırlık verilmiştir. Otomatize optik sistemlerin başarı ile kullanılmasına rağmen teknik olarak yetersiz kalmaları nedeniyle QEM*SCAN ve MLA gibi taramalı elektron mikroskop kullanılan sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlerle, özellikle karmaşık mineralojiye sahip cevherler ile nadir bulunan altın, platin grubu elementler gibi minerallerin tanımlanmasında başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Uygulama örnekleriyle anlatılan sistemler, genel olarak birbirlerinden mineral tanımlama yöntemi, işlem hızı ve verilerin sunumu açısından farklılık göstermektedir. Ancak tüm sistemlerde 10 µm'dan daha ince tanelerin analizinde benzer zorluklar yaşanmaktadır.

QEM*SCAN ve MLA gibi gelişmiş sistemler çok detaylı veriler üretebilmelerine karşın, Clemex gibi otomatik optik sistemler ile maliyet açısından karşılaştırıldıklarında kıyaslanamaz derecede pahalı oldukları görülmektedir. Gelişen teknolojiye bağlı olarak yüksek çözünürlüklü CCD kameraların üretilmesi ve yazılımların iyileştirilmesi, optik sistemlerde daha hassas ölçümlerin yapılmasını görece olarak daha ucuza mümkün kılmaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, proses mineralojisi konusunda uzman olan Dr. David N. Sutherland'e bilgi ve tecrübe desteği için teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Anon(a), 2008; <http://www.intellection.com.au>

Anon(b),2008;http://www.jktech.com.au/Products_Services/MLA/index.htm

Benvie, B., 2007; 'Mineralogical imaging of kimberlites using SEM-based techniques', *Minerals Engineering*, **20**,435-443.

Benzaazoua, M., Mariona, P., Liouville-Bourgeois, L., Joussemeta, R., Houota, R., Francoc, A. ve Pinto, A.,2002; 'Mineralogical Distribution of Some Minor and Trace Elements During a Laboratory Flotation Processing of Neves-Corvo Ore (Portugal)', *Int. J. Miner. Process.*, **66**, 163-181.

Bojcevski, D., Vink, L., Johnson, N.W., Landmark, V., Johnston, M., Mackenzie, J. ve Young, M.F., 1998; 'Metallurgical Characterisation of George Fisher Ore Textures and Implications for Ore Processing', *Mine to Mill, Brisbane, Qld*, 29-41.

Celik, I.B. ve Öner, M., 2006; 'The Influence of Grinding Mechanism on the Liberation Characteristics of Clinker Minerals', *Cement and Concrete Research*, **36 (3)**, 422-427.

Celik, I.B., Öner, M. ve Can, N.M., 2007; 'The Influence of Grinding Technique on the Liberation of Clinker Minerals and Cement Properties', *Cement and Concrete Research*, **37 (9)**, 1334-1340.

Clemex User Guide, 2001; 'Clemex Technologies Inc.', Canada, 322.

Anon (c),2008; <http://clemex.com>

Donskoi, E., Suthers, S.P., Fradd, S.B., Young, J.M., Campbell, J.J., Raynlyn, T.D. ve Clout, J.M.F., 2007; 'Utilization of Optical Image Analysis and Automatic Texture Classification for Iron Ore Particle Characterisation', *Minerals Engineering*, **20**, 461-471.

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.

Fandrich, R., Gu, Y., Burrows, D. ve Moeller, K., 2007; 'Modern SEM-based Mineral Liberation Analysis', **84**, 310-320.

Goodall, W.R. ve Scales, P. J., 2007; 'An Overview of the Advantages and Disadvantages of the Determination of Gold Mineralogy by Automated Mineralogy', *Minerals Engineering*, **20**, 506-517.

Holmes, R.J., 1998; 'The Importance of Sampling in Metallurgical Assessment and Quality Control', *The Australasian Metals Symposium, Surfers Paradise*, 16-19 August.

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

Lane, G.R., Martin, C. ve Pirard, E., 2008, 'Techniques and Applications for Predictive Metallurgy and Ore Characterization Using Optical Image Analysis', *Minerals Engineering*, **21 (7)**, 568-577.

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

Latti, D., Doyle, J. ve Adair, B.J.I., 2001; 'A QEM*SEM Study of a Suite of Pressure Leach Products From a Gold Circuit', *Minerals Engineering*, **14 (12)**, 1671-1678.

Liu, Y., Gupta, R., Sharma, A., Wall, T., Butcher, A., Miller, G., Gottlieb, P. ve French, D.H., 2005; 'Mineral Matter-organic Matter Association Characterisation by QEMSCAN and Applications in Coal Utilisation', *Fuel*, **84**, 1259-1267.

Morizot, G., Conil, P., Durance, M.V. ve Gourram Badri, F., 1997, 'Liberation and Its Role in Flotation-Based Flowsheet Development', *Int. J. Miner. Process.*, **51**, 39-49.

Nice, R.W. ve Brown, P.J., 1995; 'The Design of a Base Metals Separation Process', *Proc. XIX IMPC, San Francisco, Calif.*, **3**, 137-143

Panov, S.P., Metson, J.B. ve Batchelor, J.J., 2000; 'Beneficiation of New Zealand Ilmenomagnetites', *The AusIMM Proceedings*, **1**, 5-10.

Petruk, W., 2000; 'Applied Mineralogy in the

Mining Industry', Elsevier, The Netherlands, 268.

Sant'agostino, L.M., Alves, P.R., Shimabukurob, N. ve Bonas, T.B., 2001; 'Applied Mineralogy as a Tool for Mine Planning of Phosphate Rock', Minerals Engineering, **14 (12)**, 1649-1657.

Sutherland, D. ve Gottlieb, P., 1991; 'Application of Automated Quantitative Mineralogy in Mineral Processing', Minerals Engineering, **4 (7-11)**, 753-762.

Sutherland, D. ve Fandrich, R., 1996; 'Selective Fracture and Liberation of Minerals', In: Chemeca '96, Sydney, Australia, IChemE Aust..

Sutherland, D., 1998a; 'Applications of Quantitative Process Mineralogy through the Mining Cycle' AusIMM Annual Conference: The Mining Cycle, Mt Isa, Qld, 333 – 337.

Sutherland, D., 1998b; 'Improving Plant Performance through Process Mineralogy', Cu '98 - Australian Copper Forum.

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', Kurs Notları, Hacettepe Üniversitesi.