

1. Hafta

Kimyasal Metalurji Giriş

Ders bünyesinde, metalurjik hammaddeler ve ön işlemler; cevher hazırlama ve zenginleştirme yöntemleri; pirometalurjik süreçler ve süreçlerin genel karakteristikleri; hidrometalurji ve elektrometalurjinin temel ilkeleri; cevherlerden yola çıkılarak Fe, Cu, Zn, Pb, Al, Mg, Ti vb. metallerin üretim süreçlerinin endüstriyel uygulamaları ile üretim metalurjisi ve çevresel ilişkiler konuları aktarılacaktır.

Cevher (ore), mineral (mineral), gang (gangue), konsantre (concentrate), sinterleme (sintering), peletleme (pelletising), öğütme (grinding), kavurma (roasting), uçurma (evaporation), kalsinasyon (calcination), redüksiyon (reduction), rafinasyon (refining), mat (matte), curuf (slag), vb. gibi tanımlamalardan bahsedilecektir.

Metalurjiyi konusuna göre farklı sınıflara ayırabiliriz; fiziksel metalurji (physical metallurgy), mekanik metalurji (mechanical metallurgy), kimyasal metalurji (chemical metallurgy), mineral işleme (mineral dressing), toz metalurjisi (powder metallurgy) ve mühendislik metalurjisi (engineering metallurgy).

Fiziksel metalurji malzemeler üzerine çalışmaların bilimsel yönüyle ilgilenmektedir. Faz dönüşümleri (phase transformation), toparlanma (recovery) ve yeniden kristalleşme (recrystallization), çökelti sertleştirme (precipitation hardening), yapı-özellik ilişkisi (structure-property correlations), mikroyapı karakterizasyonları (characterization of microstructure) fiziksel metalurjiyi ilgilendiren konulardan sadece bir kaçıdır.

Metaller ve alaşımların önemini yüksek mukavemet ve plastik deformasyona uğrayabilme gibi temel mekanik özellikleri arttırmaktadır. Plastik şekil değiştirebilme özelliği çeşitli mekanik işlem yöntemlerine (çekme-drawing, haddeleme-rolling, presleme-pressing, dövme-forging, vb.) imkan sağlamaktadır. Ayrıca malzemelere tokluk ve çok zorlu koşullar altında uzun süre dayanabilme de sağlamaktadır. *Mekanik metalurji* metalik malzemeler kadar diğer malzemelerin davranışlarını bu belirtilen konular altında incelemektedir. Mekanik özelliklerin test edilmesi, malzemelerin özellikleri ile tasarımları ve seçimleri arasında bir ilişkinin kurulması, malzemelerin kullanım süresince performanslarının tahmin edilmesi ve değerlendirilmesi mekanik metalurjinin en önemli alanlarından bir kaçıdır. Ayrıca metal ve alaşımların katı haldeki mekanik işlemlerini (haddeleme, dövme, derin çekme ve ekstrüzyon gibi) de içermektedir.

Kimyasal metalurji, metallerin doğada bulunmuş olduğu bileşiklerden özütlenmesi (çıkarılması-ekstraksiyonu) ve ticari olarak kullanılmak için uygun saflığa rafine edilmesini inceleyen metalurjinin bir dalı olarak tanımlanmaktadır. Fakat başlangıç hammaddesi her zaman doğada bulunana bileşiklerle sınırlı olmak zorunda değildir. Ayrıca uç ürünün de illa metal olması gerekmez. Kimyasal işlemler çoğunlukla malzemeye uygulanan fiziksel işlemlere bağlı olarak seçilmektedir. Bu nedenden dolayı malzemelerin üretimleri sırasında tanımlanan iş akışlarında fiziksel ve kimyasal işlemleri bir arada incelememiz gerekmektedir. Birçok sayıda ve çeşitte işlemler bulunmakta ve bu işlemlerin çeşitli kombinasyonları kimyasal metalurjik uygulamalarda yararlanılmaktadır. Kimyasal metalurji, metallerin kimyasal özellikleri yanı sıra bir metalin diğer metaller veya metal-dışı elementlerle bir araya gelerek alaşım oluşturabilme özelliklerini de kapsamaktadır.

Fiziksel metalurjinin mekanik metalurji ile bağlantılı olduğu açıktır. Ayrıca kimyasal metalurjiyle de sıkı bir bağa sahiptir. Çeşitli kimyasal metalurjik proseslerin bilimsel kavramlarının oluşmasına

ve yeni prosesler ile hali hazırdaki proseslerin modifikasyonları üzerine olan tasarımlara yardımcı olur. Fiziksel metalurji ve kimyasal metalurji arasındaki bağlantı zamanla büyümüştür. Bu bağlantı sayesinde empirik ve deneme-yanılma anlayışı yerini mantık ve bilim tabanlı anlayışa bırakmıştır. Örnek olarak, yeni bulunan bir cevher kaynağı üzerinde x-ışını difraktometresi, elektron mikroskobu ve elektron prob mikroanalizörü gibi fiziksel metalurji cihazları ile çalışılarak cevher kaynağı hakkında bilgiler elde edilebilir ve uygun üretim yöntemleri ile kullanım alanları daha doğru bir şekilde oluşturulabilir. Mineralin türü ve doğası üzerine çalışıldığı ve analizler yapıldığı sürece cevherin değerlendirme prosesleri üzerine kullanılabilir doğru tahminler yapılabilir. Refrakter mineralleri çözümlendirmek için aşırı korozif çözeltilere ve yüksek basınca ihtiyaç duyulmaktadır (yüksek sıcaklık ve basınçlarda işlem yapmaya izin veren otoklav gibi).

Mineral işleme fiziksel olarak mineral yapısında sıkışmış olan istenilen bileşiklerin kırma öğütme gibi işlemlerle serbest hale gelmesini ve devamında gelen uygulamalarda kullanılmasını içeren çalışma alanıdır. Taneler veya bileşikler serbestleşince, manyetik ayırma (magnetic separation), elektrostatik ayırma (electrostatic separation), eleme (screening), flotasyon (flotation) olarak adlandırılan fiziksel cevher zenginleştirme işlemlerine tabi tutulur; konsantre adı verilen zenginleştirilmiş ürünler elde edilir ve devamında kimyasal metalurji işlemleri uygulanır.

Toz metalurjisi, toz formundaki metal, malzeme ve katı endüstriyel ürünlerin üretilmesi ve işlenmesi ile ilgilenmektedir.

Mühendislik metalurji ise ergimiş durumdaki metal ve malzemelerin işlenmesi ile ilgilenmektedir. Dökümhane, metal kaynağı ve ilgili konular bu kapsam içerisinde incelenmektedir.

Kimyasal metalurji; metal veya metal alaşımlarının cevherlerden kazanılması, rafine edilmesi ve metalik malzeme olarak endüstrinin hizmetine sunulması görevini yerine getirdiğini belirtilir. Metallerin özütlenmesi (kazanılması) temel olarak doğadaki bulunma durumuna bağlıdır. Doğada bulunma durumunu belirleyen üç adet ifade bulunmaktadır. Bunlar; yer kabuğundaki miktarı (crustal abundance), kaynak (resources) ve rezervdir (reserves). Yer kabuğunda miktar olarak en fazla bulunan alüminyum, demir ve magnezyum sırasıyla ağırlıkça ortalama % 8,1, % 5,0 ve % 2,1 bileşiminde yer almaktadır. Daha nadir metal olan titanyum ise yer kabuğunda ağırlıkça % 0,53 oranında bulunmaktadır. Hiçbir metal yer kabuğunda bulunduğu bileşime sahip kaynaklardan üretilemez. Neyse ki, jeo-kimyasal süreçler elementlerin yer kabuğunda seçici olarak bileşimlerini arttırmasına yardımcı olmuştur. Şimdi veya ileriki bir tarihte ekonomik olarak değerlendirilebilmesine imkan sağlayan bu oluşumlara cevher rezervi ya da cevher kaynağı denilmektedir. Kaynak olarak tanımlanan oluşumlar zaman geçtikçe rezerv olarak kullanılabilir. Yüksek tenörlü rezervler (high grade reserves) veya üretimi istenen metalin yüksek bileşimlerde bulunduğu cevher kütleleri (ore bodies) geçmiş dönemlerde seçilerek çıkarılmış ve işlenmiş olduğu için günümüzde çok az miktarlarda bulunmaktadır. Günümüzde bulunan cevher kütleleri ya düşük tenörlü ya da karmaşık (complex) bileşimlere sahip olarak bulunmaktadır. Gelecekte ise tenör daha da düşecek ve karmaşık bileşimler daha da artacak, dolayısıyla bu tür kaynaklardan metal üretimi daha da zorlaşacaktır.

Düşük tenörlü ve karmaşık bileşimlere sahip cevherlerin günümüzde işleniyor olması metal üretim akış şemasında bulunan mineral işleme yöntemlerinin temel bir proses olmasına neden olmaktadır. Bu nedenden dolayı da minerallerin fiziksel ve kimyasal karakterizasyonlarının yapılması önem arz etmektedir. Mineral zenginleştirme (mineral beneficiation) işlemlerinden olan elektromanyetik ve elektrostatik ayırıcılarda minerallerin manyetik ve elektriksel özelliklerinden

yararlanılmaktadır. Flotasyon işleminde ise minerallerin yüzey özellikleri göz önünde bulunmaktadır.

Cevherlerden veya birincil kaynaklardan metal üretimi sırasında iki önemli faktör bulunmaktadır. Birincisi cevherin temini ve ulaşılabilirliğinin limitli olması, diğeri ise üretim kademeleri sırasında yüksek miktarlarda enerji tüketimidir. Bu kısıtlamaların üstesinden gelmek için metallerin geri dönüşümü (recycling) veya ikincil kaynakların işlenmesi yoluna başvurulmaktadır. Hurdaların geri kazanımı sırasında cevherden metal üretimine göre çok çok az bir enerji kullanımına gerek duyulmaktadır. Geri dönüşüm sırasında yeni bir kaynak kullanılmadığı için çevre kirliliği de çok daha az gerçekleşmektedir. Bu avantajları sayesinde, metal üretimi sırasında geri dönüşüm çalışmalarının önemi her geçen gün artmaktadır.

Cevherden başlayarak ticari kullanıma uygun metale giden yolu gösteren diyagramlara üretim akış şeması adı verilmiştir. Bu şemalar temel süreçlere makul ilavelerin yapılarak bir çalışma şemasının oluşturulmasını içermektedir. Bir akış şemasının, temel süreçler ve ilave süreçlerde ki gelişmelere göre değişebilir olması istenmektedir. Kimyasal metalürjideki gelişmeler bu değişimlere bağlı olarak gerçekleşmektedir. Kimyasal metalürji alanında gelecek on yıllarda daha fazla gelişmeler görebiliriz. Bunun nedeni daha yüksek saflığa sahip metallerin daha düşük tenörlü ve karmaşık cevherlerden yola çıkılarak, en az enerji ve en az çevre kirliliği oluşturacak bir şekilde üretilmek istenmesinden kaynaklanacaktır. Bu talepler yeni üretim süreçleri ve gelişmelerin yanı sıra üretim metalürjisinin metalürjinin önemli ve dinamik bir dalı olmasına neden olmaktadır. (Gupta - Acquaintance)

Üretim metalürjisi (extractive metallurgy) metallerin cevherlerinden çıkartılıp rafine edilmesi sanatı olarak tariflenebilir. Bu ders bünyesinde üretim metalürjisindeki prosesler, operasyonlar, teknolojiler ve üretim yollarından bahsedilecektir. Metal ve alaşımlarının üretilmesi günümüzün en önemli endüstrilerinden birisidir. Bu endüstri şu şekilde karakterize edilmektedir:

- 2015 yılında birincil kaynaklardan metal üretimi çelik için 1,64 milyar ton ve kobalt için 124000 ton arasında olmuş ve metal üretimi çok geniş aralıklarda gerçekleşmiştir.

Çizelge 1. 2015 yılı Dünya genel metal üretim rakamları (usgs.gov)

Metal	Çelik	Al	Cu	Zn	Pb	Ni	Mg	Ti	Co
Miktar (milyon ton)	1640	58,30	21,10	13,90	10,65	2,53	0,910	0,171	0,124

- 1950-1973 yılları arasında ve 2000 yılından sonra çok yüksek artış oranına sahiptir. 1950 yılında yıllık çelik üretimi 200 milyon ton olmuştur. Alüminyum 1950 yılında yılda 2 milyon ton üretilirken; 1973 yılında yıllık üretim 10 milyona, 2007 yılında 38 milyon tona ulaşmıştır. Geçmiş on yıllarda, gelişmekte olan ülkelerde yıllık metal üretim miktarları ton bazında yavaşlamış olmuştur, bunun nedeni malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin geliştirilerek, aynı iş için daha az miktarda malzeme kullanılmasından dolayıdır. Buna rağmen, 2002-2007 yılları arasında Çin’de üretilen çelik miktarı yıllık 182 milyondan 489 milyona çıkmıştır.
- Çelik ve titanyum metallerinin arasında 20-25 kat üretim maliyeti olmaktadır. Metal üretimleri sırasında yatırım, cevher ve enerji tüketimi temel maliyetleri oluşturur. Enerji tüketimi çelik üretiminde 20 GJ/ton, alüminyumda 80 GJ/ton ve titanyumda 160 GJ/ton olmaktadır.

- Metaller birden fazla üretim yöntemi ile üretilebilir. Seçilen bir metal için uygulanmakta olan endüstriyel üretim süreci; hammadde, enerji, ekipman maliyetleri ile pazar payına bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Metallerin Hammadde Kaynakları

Metaller, birincil kaynak olarak adlandırılan doğada buldukları kaynaklardan ve ikincil kaynak olarak adlandırılan hurda gibi işlenmiş kaynaklardan yola çıkılarak üretilmektedir. Birincil metal üretimleri kimyasal metalurji işlemlerinin çok büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Birincil veya ikincil kaynakların kullanılarak üretilen metallerin kaliteleri arasında bir ayrım yoktur. Ayrıca metallerin birincil veya ikincil kaynaklar kullanılarak üretilmiş olduğunu göstermek için herhangi bir test veya analiz de bulunmamaktadır. Son ürünlerin kalitesini birincil veya ikincil kaynakların kullanılması belirlemez. Hurdalar metal üretimleri için çok önemli kaynaktır. En iyi kaliteli paslanmaz çelikler neredeyse tamamen hurda kullanılarak üretilmektedir.

Yer kabuğu

Geoit şekline sahip Dünya beş ana bölgeden oluşmaktadır:

- i) Atmosfer (atmosphere) (yüzeyin yaklaşık 250 km üstüne kadar olan bölge; kimyasal içerik: N₂, O₂, H₂O, CO₂, inert gazlar; fiziksel hali: gaz)
- ii) Hidrosfer (hydrosphere) (kalınlık: 0,11 km; kimyasal içeriği: tuzlu ve tatlı su; fiziksel hali: sıvı)
- iii) Litosfer (lithosphere) (kalınlık: 1200 km; kimyasal içerik: silikatlı kayalar; fiziksel hali: katı)
- iv) Manto (mantle-chalcosphere) (kalınlık: 1700km; kimyasal içerik: ağır metallerin sülfürlü bileşikleri; fiziksel hali: katı)
- v) Çekirdek (core-siderosphere) (kalınlık: 3500km; kimyasal içerik: ergimiş demir-nikel; fiziksel hali: sıvı)

Atmosfer mineral içermemektedir (fakat amonyum içerikli gübreler için azot ve endüstriyel uygulamalar için argon kaynağıdır), manto ve çekirdek ise erişilebilir sınırdır (en derin madencilik çalışması yaklaşık 5200m kadardır). Hidrosfer ise magnezyum ve sodyum üretiminin temel kaynaklarından biridir. Litosfer olarak adlandırılan kabuk ve üst mantonun en üst bölümü ana metal ve malzemelerin birincil üretim kaynağı olmaktadır. Bilimsel araştırmalar daha çok kalınlığı 410 km olarak tahmin edilen bu bölüm üzerine durmaktadır. Üzerinde yaşadığımız karaları kaplayan ve azami 25-35 km kalınlığa erişen "SiAl" diye adlandırılan en üst tabakalar ve denizlerden azami 5-10, karalardan azami 50 km derinliğe kadar giden "SiMa" tabakaları araştırmaların ağırlık merkezini oluşturmaktadır.

SiAl tabakasında ağırlıkça yaklaşık % 95,0 oranında volkanik kayalar, % 4,0 şist, % 0,75 kumtaşı ve % 0,25 kireçtaşı yer almaktadır. Elementlerin miktar olarak dağılımına bakılacak olursa 13 element (O₂, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, P, H₂, C ve Mn) yer kabuğunun ağırlıkça % 99,5'ini oluşturmaktadır. Bu elementler genelde silikatlı ve oksitli; çok az miktarlarda da karbonatlı, fosfatlı ve diğer bileşik formlarındadır. Elementlerin doğada bulunuş sırası Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Elementlerin litosfer tabakasındaki ortalama bileşimleri

Ağırlık aralığı	Elementler
% 10'dan fazla	O (46,6); Si (27,7)
% 1 – 10	Al (8,1); Fe (5,0); Ca (3,6); K (2,6); Na (2,8); Mg (2,1)
% 0,1 – 1,0	C; H; Mn; P; Ti
% 0,01 – 0,10	Ba; Cl; Cr; F; Rb; S; Sr; V; Zr
% 0,001 – 0,010	Cu; Ce; Co; Ga; La; Li; Nb; Ni; Pb; Sn; Th; Zn; Yt
1 – 10 ppm	As; B; Br; Cs; Ge; Hf; Mo; Sb; Ta; U; W; ve RE elementlerinin birçoğu
0,1 – 1,0 ppm	Bi; Cd; I; In; Tl
0,01 – 0,10 ppm	Ag; Pd; Se
0,001 – 0,010 ppm	Au; Ir; Os; Pt; Re; Rh; Ru

Mineral ve Cevher:

Yer kabuğunu teşkil eden, doğal olarak belirli bir kimyasal yapıdaki homojen maddelere **Mineral** denir. Mineralojik bakımdan incelendiğinde, SiAl'in alüminyumca zengin silikatlardan ve SiMa'nın ise demir ve magnezyumca zengin silikatlardan oluştuğu rahatlıkla söylenebilir. Yer kabuğunun 35 km derinliğine kadar olan ortalama yoğunluğu 3,3 g/cm³ olarak ifade edilmektedir.

Endüstride ekonomik şekilde üretime yarayan minerallere **Cevher** adını vermekteyiz. Her cevher bir mineraldir, fakat her mineralizasyon bir cevher olmamaktadır. Örneğin; yer kabuğunda hemen her yerde alüminyum minerallerine rastlanmakta, ama alüminyum üretimi için teknik ve ekonomik açıdan belirli konsantrasyonlar ve özellikler aranmaktadır. Bu bileşim ve özelliklere sahip mineraller cevher olarak sayılmaktadır.

Cevherler bir tek değerlendirilebilir metal içerebildikleri gibi birden çok metalin bulunduğu kompleks cevherler de bulunmaktadır. Bir cevherden sadece bir metalin ekonomik olarak kazanıldığı cevherlere Fe, Al, Cr ve Hg cevherleri örnek verilebilir. Birden çok metalin kazanımının olabildiği cevherlere ise Cu, Pb, Zn, Ni cevherleri örnek olarak gösterilebilir: Cu-Ni, Cu-Mo, Cu-Au, Pb-Zn, Zn-Cd, Fe-Ti, Ni-Co, Fe-Mn, Sn-W, Pb-Zn-Cu, Pb-Ag-Au, Pb-Cu-Ag-Au, Ni-Cu-Au-Pt, Pb-Zn-Cu-Ag-Au.

Bir cevher içerisinde çeşitli metallerin bir arada bulunması iyon yarıçapları ve kimyasal benzerlik gibi iki ana faktöre bağlıdır. Hem iyon yarıçapları hem kimyasal benzerlikleri birbirine çok yakın olan Co-Ni, Mo-W, Nb-Ti cevherlerde yan yana sık rastlanan metallerdir. Sadece iyon yarıçapları birbirine yakın olan metaller de, kimyasal benzerlik açısından önemli farklar olsa bile cevherlerde yan yana sık rastlanabilir. Ni ve Mg buna bir örnektir. New Caledonia'da yer alan garnierit yataklarının Ni-Mg-silikat türünde olmasının nedeni, Ni²⁺ ve Mg²⁺ iyonlarının eşdeğer iyon yarıçaplarına sahip olmasından gelmektedir. Aynı şekilde Pb ve Zn çoğunlukla yan yana bulunurlar. İyon yarıçapları çok farklı olmasına rağmen sadece kimyasal benzerlik yönünden bir arada rastlanan metallerin cevherlerine ise Al cevheri olan boksit içerisinde Galyumun devamlı olarak bulunması verilebilir.

Bir cevherin içerisinde mevcut metal miktarına **Tenör** denilir. Tenör genellikle ağırlık yüzdesi olarak ifade edilir. Au, Ag gibi soy metallerde ise konsantrasyonlar çok düşük olduğundan tenörler tonda gram ya da ppm (part-per-million) olarak verilir. Bir cevherin tenörü ne kadar yüksekse değeri o kadar fazladır. Yani yukarı doğru tenör sınırlaması yapılmaz, buna karşılık aşağı doğru cevherin kıymeti ekonomik karlılığa göre sınırlandırılır.

Ekonomik minimum tenör alt sınırı (cut-off grade) çeşitli faktörler tabidir fakat genel bir geçerli rakam verilemez.

- Cevher yatağının durumu (yüzeye yakın cevherler açık işletmeler uygun ise, yeraltı madenciliğine göre daha ucuza çıkarılabilir)
- Cevher yatağının rezervi (düşük tenörlü fakat çok büyük yataklar ekonomik sınırlar dahiline girebilir)
- Pazar yerine mesafe (pazarlara uzak bir cevher ekonomik olmazken, aynı tip ve pazarlara yakın bir cevherin işletilmesi mümkün olabilir)
- Metalin piyasa değeri (Ekonomik ana faktörlerdendir. Örneğin % 30 Fe içeren bir cevher demir cevheri olarak bir değer ifade etmezken, tonda 10 gram altın içeren bir hammadde değerlidir)
- Metal üretim masrafları
- ve diğer masraflar,

gibi faktörlerin tümü yardımıyla ve satış imkanları, organizasyon, kredi temini, vergi durumları gibi ekonomik şartların ele alındığı fizibilite etüdü ile her cevher için tenörün ekonomik alt sınırının araştırılması gerekmektedir. Bunlar dışında cevherlerin içerdiği safsızlıkların da rolü büyüktür. Bazı cevherlerde arsenik oluşu cevherin kalitesini fiyatını kötü yönde etkilerken, değerli safsızlıkların (örneğin Cu cevheri içerisindeki Mo'nin) cevherlerin değerlendirilebilmesine katkı yapmaktadır.

Cevher yataklarının oluşumu:

Cevher yatakları yer kabuğunda katı kayaç kütleleri arasında veya içerisinde yer almaktadır. Kayaç kütlelerini şekillendiren Jeolojik süreçler ayrıca cevherlerin durumunu da oluşturmaktadır. Kayaç kütleleri üç farklı şekilde oluşmaktadır: (i) magmatik (magmatic), (ii) tortul-çökelti (sedimentary) ve (iii) başkalaşmış (metamorphic). Jeolojik süreçlerin şekillendirdiği bu kaya kütleleri birbirleri ile ilişkili ve dönüşümlü olmaktadır. Şekil 1'de kayaçların dönüşüm süreçleri tanımlanmaktadır.

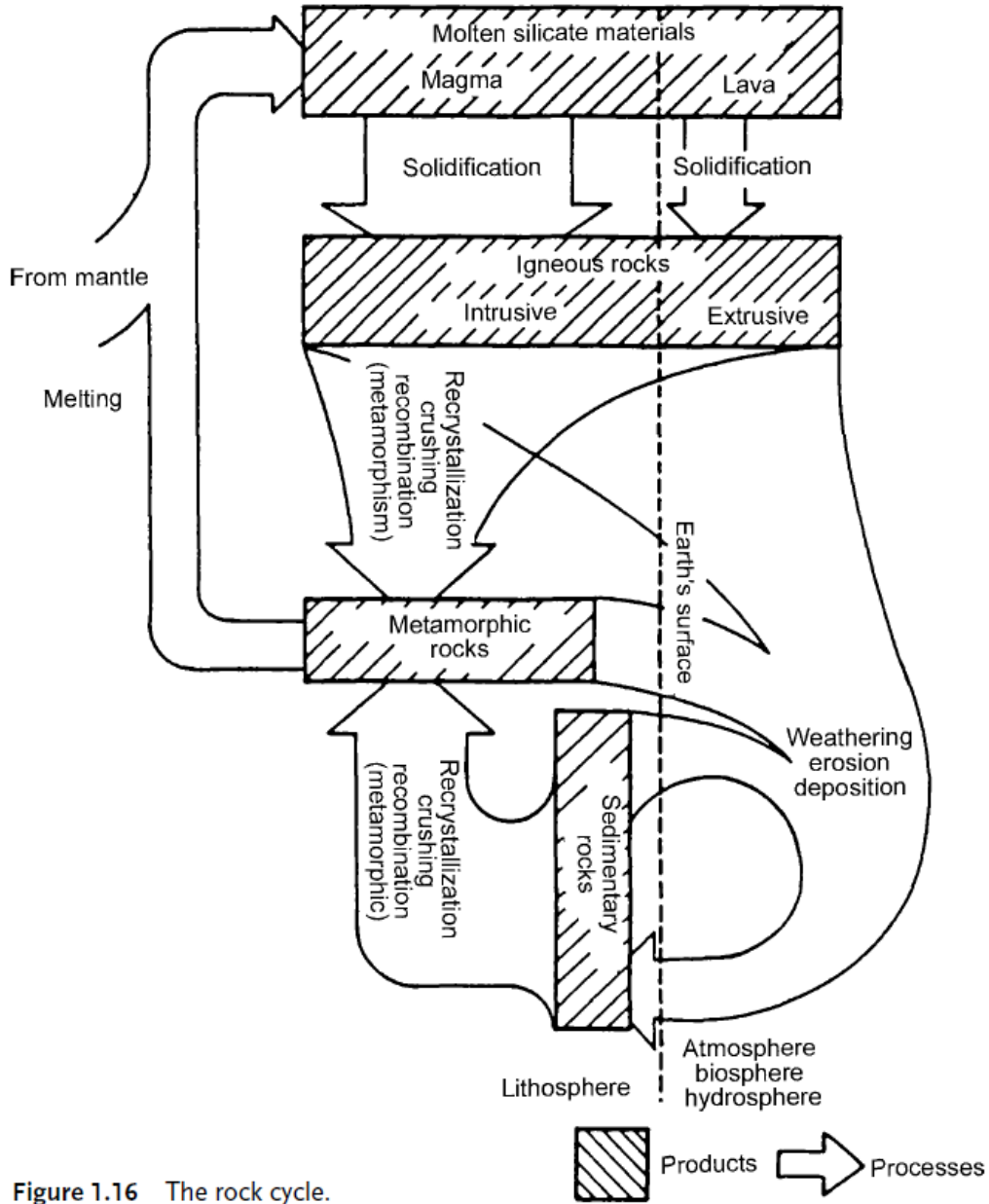


Figure 1.16 The rock cycle.

Şekil 1. Kayaçların dönüşüm süreçleri

Magmatik oluşumlar ve kayaçlar: Magmatik kayaçlar ergimiş haldeki magmanın katılaşması sonucunda oluşmaktadır. Katılaşma süreci eğer yüzeyle ulaşmadan yer kabuğunun derinliklerinde meydana geliyorsa sokulmuş (intrusive) ya da plütonik (plutonic) kayaç; yüzeyle ulaşmış meydana geliyorsa püskürük (extrusive) ya da volkanik (volcanic) kayaç olarak isimlendirilir. Mineraller bütün magmatik kayaçlarda bulunabilir; katılaşmanın sürecine, sıcaklık, basınç, katılaşma hızı, çözülmüş gaz miktarına göre kimyasala bileşim çeşitlilik göstermektedir. Magma ve magmatik kayaçların % 99'unu on adet element oluşturmaktadır (O₂, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, H₂), geriye kalan %1'i ise periyodik tablodaki diğer elementler oluşturmaktadır. Türlerine göre: erken magmatik (early magmatic), geç magmatik (late magmatic), karışmaz sıvı (immiscible liquid), porfiri metal (porphyry deposit) cevher yatakları bulunmaktadır.

Tortul oluşumlar ve tortul kayaçlar: Tortul kayaçlar dış etkenler tarafından kayaçların aşındırılıp aşınan parçaların başka bölgede birikip sıkışmasıyla oluşmaktadır. Fe, Mn, Cu, P, S, Zr, nadir metaller, U ve V'un değerli mineralleri ve cevherleri tortul oluşum kaynaklıdır.

Metamorfik oluşumlar ve kayaçlar: Metamorfizm terimi kayaçların çevrede meydana gelen kimyasal ve fiziksel değişimlere bağlı olarak katı halde göstermiş olduğu değişimi olarak kullanılmaktadır. Bu değişim temelde kayaç içerisindeki kimyasal bileşimi etkilemeden sadece minerallerin yeniden kristalleşmesi veya sulanmasıyla meydana gelmektedir. Sıcaklık, basınç ve kimyasal aktivitenin bir veya daha fazlasına maruz kalarak kayaçlar dönüşüm gerçekleştirir.

Cevherlerin ekonomik seviyede bir bileşime ulaşmasına neden olan doğa olayları şu şekilde sıralanabilir:

- Ergimiş magma üzerinde katılaşma. Örneğin İsveç'teki manyetit yatakları bu şekildedir. Genellikle kromit yatakları da magmatik orjinlidir.
- Magmatik sıcak çözeltilerde çökelmeler. Cornwall'daki kasiterit yatakları ve sülfür minerallerinin çoğunluğunun temeli budur.
- Erozyon yolu ile taşınma ve yığılma. Alüvyon yatakları bu cinstendir.
- Yüzey sularında çökme, pH ve benzeri şartlardaki değişimler yüzey sularındaki çözülmüş maddelerin çökmesine sebebiyet verebilir. Örneğin; limonit, siderit ve hematit yatakları.
- Yüzey sularının buharlaşması sonucu çözeltinin çözülmüş maddelerce zenginleşmesi büyük ekonomik öneme sahip olabilir.
- Boşlukların doldurulması yolu ile cevher yataklarının oluşması da mümkündür. Örneğin kaynak sularının aşağı doğru kayaçlar içindeki hareketi esnasında rastlanılan boşluklarda çökelmeler olabilir (manyetit gibi).

Minerallerin sınıflandırılması Çizelge 3'te verilmiştir. Minerallerin sınıflandırılmasında en büyük ana yapıyı oluşturan anyonlar (basit veya karmaşık) göz önünde bulundurulmuştur. Sadece nabit haldeki cevherlerde bu durum gözlenmez. Bu cevherlerde bulunan metal herhangi bir anyon veya katyona bağlı olmayıp elektriksel açıdan yüksüzdür.

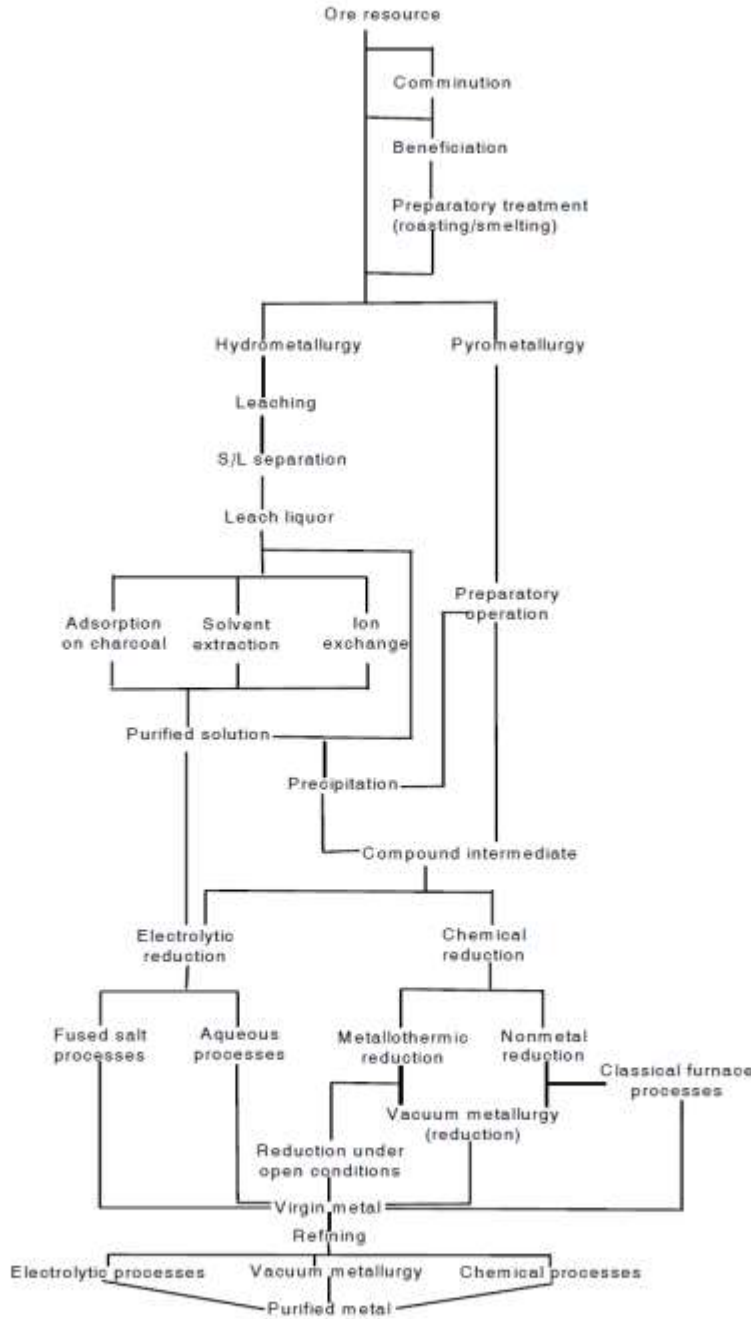
Çizelge 3. Minerallerin sınıflandırılması.

Seri No	Sınıf	Örnek
1.	Nabit (element, metal)	Au, Ag, Cu, As, Sb, Bi, S
2.	Sülfürlü cevher	Galen (Galena-PbS), Sfalerit (Sphalerite-ZnS), zincifre (Cinnabar-HgS), pirotin (pyrrhotite-FeS), kalkopirit (chalcopyrite-CuFeS ₂)
3.	Halojenürlü cevher	Halit (halite-NaCl), silvit (sylvite-KCl), florit (fluorite-CaF ₂)
4.	Oksitli ve hidroksitli cevher	Kuprit (cuprite-Cu ₂ O), uranit (uraninite-UO ₂), badeleyit (baddeleyite-ZrO ₂), korundum (corundum-Al ₂ O ₃), hematit (hematite-Fe ₂ O ₃), rutil (rutile-TiO ₂), kasiterit (cassiterite-SnO ₂), brusit (brucite-Mg(OH) ₂), diyaspor (diaspore-Al(OH) ₃), götit (goethite-FeO(OH)), limonit (limonite-FeO(OH).H ₂ O)
5.	Silikatlı cevher	Zirkon (zircon-ZrSiO ₄), beril (beryl-Be ₃ Al ₂ (SiO ₃) ₆), torit (thorite-(Th,U)SiO ₄), topaz (topaz-Al ₂ SiO ₄ (F,OH) ₂), silimanit (sillimanite-Al ₂ SiO ₅)
6.	Boratlı cevher	Kolamanit (colemanite-Ca ₂ B ₆ O _{11.5} (H ₂ O)), boraks (borax-Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O)
7.	Karbonatlı cevher	Siderit (siderite-FeCO ₃), manyezit (magnesite-MgCO ₃), dolomit (dolomite-CaMg(CO ₃) ₂), smitsonit (smithsonite-ZnCO ₃)
8.	Nitritli cevher	Sodyum nitrat (soda-niter-NaNO ₃)
9.	Forfatlı cevher	Monazit (monazite-(RE)PO ₄), ksenotim (xenotime-YPO ₄)
10.	Sülfatlı cevher	Barit (barite-BaSO ₄), anglesit (anglesite-PbSO ₄), yarosit (jarosite-KFe ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂), cips (gypsum-CaSO ₄ .2H ₂ O)
11.	Molibdat ve tungstatlı cevher	Şelit (scheelite-CaWO ₄), povelit (powellite-CaMoO ₄), vulfenit (wulfenite-PbMoO ₄), ferrimolibdit (ferrimolybdite-Fe ₂ (MoO ₄) ₃ .nH ₂ O)

Doğada sadece altın, gümüş, platin ve ender durumlarda bakır metalik durumda bulunabilirler. Bunların dışında metalürjinin kapsamına giren diğer metaller kimyasal bileşikler halindedir. Periyodik tabloda Co metalinin sağ tarafında bulunan bütün metaller (Sn hariç) genellikle sülfürlü; sol tarafında bulunanlar ise (Mo hariç) genellikle oksitli mineraller şeklinde işlenmektedir. Metalürjik süreçlerdeki en önemli hammaddeyi maden cevherleri oluşturur. Cevherler dışında hammadde olarak sayılabilecek ikinci büyük grup hurda malzemelerdir. Hurda malzemelerin metalürji teknolojisindeki önemi, özellikle korozyona dayanıklı metaller açısından çok önemlidir. Cu, Pb, Al ve Zn dünya üretiminin ortalama üçte biri hurda kaynaklı olmaktadır. Cevherler ve hurda malzemeler haricinde çeşitli teknoloji kollarının çeşitli safhalarında özellikle metalürjik işlemler sırasında oluşan ara ürün ve yan ürünler de metalürjik hammaddeler olarak kullanılmaktadır. Metalürjik atıklar, küller, baca tozları, vb. bu sınıfa girmektedir.

Genel Çalışma Şeması

Mineraller ve özellikle cevherler doğada çok çeşitli kimyasal ve mineralojik bileşimlerde, büyük farklılıklar gösteren konsantrasyonlarda bulduklarından, tüm metalürjik süreçleri kapsayan genel bir çalışma şeması vererek cevherden metal veya alaşıma veya saf metale giden yolu göstermek çok güç hatta imkansızdır. Buna rağmen bugün büyük miktarlarda üretilen ve kullanma sahasına sahası geniş olan ana metallerin benzer karakteristiklerinden faydalanmak yoluyla bir genelleştirme yapmak düşünülebilir. Genel çalışma şeması Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Cevherden metal üretimi sırasında genel çalışma şeması

Cevherden saf metale giden ana yolun çeşitli fiziksel değişimleri (teknolojik açıdan bunlar temel operasyonlar olarak tanımlanmaktadır) ve çeşitli kimyasal dönüşümleri (bunlar temel prosesler olarak tanımlanmaktadır) kapsadığı ilk olarak göze çarptığı gibi, şemanın ana hatlarıyla üç kademe de incelenebileceği kolaylıkla görülebilir.

Cevherden metale giden ana yol bu düşünceler çerçevesinde; Konsantrasyon-Redüksiyon-Rafinasyon ve Konsantrasyon-Rafinasyon-Redüksiyon şeklinde üç ana kademeli olarak basitleştirilebilir. Konsantrasyon kademesi genel çalışma şeması içinde çoğunlukla ilk aşama olarak görünmesine rağmen redüksiyon ve rafinasyonun yer değiştirdiği haller mevcuttur.

Konsantrasyon: Günümüzde çok zengin cevherlere nadiren rastlanılması, zengin tenörlü cevher rezervlerinin gün geçtikçe azalması bu kadememin önemini ortaya koymaktadır. Doğadaki cevherlerin tenörleri, içerdikleri istenmeyen yan elemanların (gang) türü ve miktarları, ana ve yan kayaçların cinsi ve fiziksel yapıları bir taraftan, metalürjik işlemlerin gerektirdiği teknik şartlar ile ekonomik değerlendirmeler diğer taraftan cevherlerin genellikle bir konsantrasyon işlemine tabi tutulmalarını gerekli kılar. Konsantrasyon işlemi cevher hazırlama, ergitme, uçurma vb. fiziksel değişimler yolu ile (veya temel operasyonlar uygulanarak) olabildiği gibi; oksitleme, redükleme, çözümlendirme vb. gibi kimyasal dönüşümlerden faydalanılarak (yani temel prosesler uygulanarak) veya bunların uygun kombinasyonları ile yapılır. Konsantrasyonun görevi üretimi istenen malzemelerin (metal, alaşım veya bileşik) ekonomik değeri olmayan (gang) diğer kısımlardan ayrılarak bir veya birkaç ürün içerisinde tenörce zenginleştirilmesidir.

Redüksiyon: Metallerin kimyasal bileşiklerinden serbest metalik hale geçmeleri bu kademedeki gerçekleşir. Elektron kazanma olarak tariflenirse genel çalışma şemasında belirtilmek istenen anlaşılır. Redüksiyona tabi tutulan malzemeler ve redükleyiciler katı, sıvı ve gaz halinde olabildikleri gibi, bir çözelti içerisinde iyonlar halinde de bulunabilirler. Kimyasal bileşik içerisinde "Me" ile temsil edilen metal eğer +2 değerlikteyse, iki adet elektron kazanarak redüklenmektedir: $Me^{+2} + 2 e^{-} = Me^0$

Rafinasyon: Redüksiyon sonucu elde edilen metaller, diğer metal ve metal olmayan maddeleri de çoğunlukla içermektedir. Fakat endüstride istenen metal ve alaşımlarda diğer metal ve metal olmayan maddelerin belli limit değerlere sahip olması istenmektedir. Dolayısıyla, redüksiyon sonucu elde edilen ve Ham-Metal (veya İzabik metal) denilen malzemelerin safiyetlerinin yükseltilmesi ve istenmeyen katkı maddelerinin ayrılması gerekir. Çok saf bir metalin istenilen safiyetlere çıkarılması için yeniden ergitme ve zon rafinasyonu gibi çeşitli işlemler uygulanır, eğer istenilen sonuç alınmazsa genellikle rafinasyon işlemi redüklenmiş metal ile katkı maddelerinin termodinamik özelliklerinden (oksidasyon, redüksiyon) yararlanılarak uygun kimyasal dönüşümler ile yeni uygulamalar sayesinde yapılır. Rafinasyon yüksek safiyette metal üretimine imkan veren ve uygulama sahası çok geniş olan bir aşamadır.

Buraya kadar bahsedilen işlemler Konsantrasyon-Redüksiyon-Rafinasyon işlem sırasını takip etmektedir. Fakat eğer bir rafinasyonda temizlenecek metalin içerdiği katkı maddeleri bu metalden daha asal (soy) ise çalışma şemasında Konsantrasyon-Rafinasyon-Redüksiyon sırasını takip etmek zorundayız. Bu durumda önce kazanılmak istenen metal, kimyasal bir bileşim halinde katkı maddelerinden ayrılır ve buradan elde edilen yüksek safiyetteki metal bileşiği redüksiyona tabi tutularak metal haline getirilir.

Metalurjiyi uygulama şartlarına göre:

- Yüksek sıcaklık işlemlerini belirten "Pirometalurji (pyrometallurgy)"

- Sulu ortamlarda yapılan işlemleri belirten “Hidrometalurji (hydrometallurgy)” ve
- Elektrik enerjisinden yararlanılan işlemleri belirten “elektrometalürji (electrometallurgy)”

Şeklinde gruplandırmak günümüzde halen yaygın ve benimsenmiş bir durumdur. Elektrometalurjiyi kendi içerisinde; elektrik enerjisinin kimyasal bir iş gördüğü işlemleri belirten “elektrokimya” ve elektrik enerjisinin termik bir iş gördüğü işlemleri belirten “elektrotermi” şeklinde ayrıca ikiye ayırmak da günümüz terminolojisinde benimsenmiştir.

Çeşitli metallerin değişik hammaddelerden üretimini gösterene işlem akış şemaları incelendiğinde, metalürjik üretim kademeleri piro, hidro, elektrometalürji işlemlerinin çoğunlukla birden fazla grubuna dahildirler.