

2. Hafta

Metalurjide uygulanan ön ve ara işlemler: Cevher hazırlama ve zenginleştirme

Metalurjik bir hammaddeden metale giden yol, hammaddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine uygun bir şekilde seçilmiş bir seri işlemlerin tekno-ekonomik açıdan kombinasyonudur. Hammaddelerle çeşitli işlemlerden elde edilen ürün veya ara ürünlere temel metalurjik işlemlere girmeden önce, teknolojik ve ekonomik nedenler çerçevesinde uygulanması gerekli ön ve ara işlemler: yüzey büyültme (boyut küçülme), malzeme ayırma, malzeme karıştırma, yüzey küçültme (boyut büyültme) işlemleridir. Bir cevherdeki çeşitli minerallerin kimyasal yapılarını bozmadan, endüstrinin ihtiyacı olan en uygun hammadde haline getirmeye ve ekonomik değer taşıyan minerallerin, ekonomik değeri olmayan minerallerden ayrılma işlemlerinin bütününe “Cevher Hazırlama” veya “Cevher Zenginleştirme” denir.

Bir cevherin endüstride kullanılabilmesi için kullanım alanlarının farklılığına göre değişik şartlar aranır. Bu şartlardan başlıcaları:

- Cevheri oluşturan tanelerin belirli bir büyüklükte olması şartı
- Cevherin içerdiği kıymetli element veya kıymetli mineral yüzdesinin belirli bir yüzdenin üstünde olması
- Cevherin içerdiği zararlı element veya zararlı mineral yüzdesinin belirli bir yüzdenin altında olması şartı

Bu şartlar cevher hazırlama yöntemleriyle sağlanabilmektedir. Şöyle ki; tane boyutlarının istenen büyüklükte olması için: boyut küçültme (kıırma, öğütme), boyuta göre sınıflandırma (eleme, sınıflama) uygulanmaktadır.

Kıymetli element yüzdesinin yükseltilmesi ve zararlı element yüzdesinin azalması ise cevherdeki artık malzemelerin atılmasıyla sağlanmaktadır. Bu yöntemde, artık malzemenin atılmasıyla geriye kalan kısım, kıymetli mineral yönünden zenginleşeceğinden bu yönetime cevher zenginleştirme yöntemi denilmektedir.

Cevher hazırlama aşamalarında karşılaşılabilecek terimler:

Mineral: Doğada bulunan, belirli bir fiziksel ve kimyasal yapıya sahip olan bileşiklere denir.

Kıymetli mineral: Ekonomik değer taşıyan minerallere denir. Pirit, galen, kalkopirit, smitsonit, serüzit, şelit, gibi

Kıymetsiz mineral: Ekonomik değer taşımayan minerale denir. Ayrıca Gang minerali olarak da anılmaktadır. Örneğin krom yatağındaki serpantin ve olivin mineralleri gibi

Cevher: Yerkabuğunda bulunan ve olduğu gibi veya bazı işlemler sonucu ekonomik değer taşıyan kayaca denir. Cevherler genellikle birden fazla mineral içermektedir. Yani cevherler bir mineral topluluğudur. Örneğin bir kurşun cevherinde; galen (PbS), sfalerit (ZnS), kalkopirit (CuFeS₂), argentit (Ag₂S), pirit (FeS₂), kuvars (SiO₂), kalsit (CaCO₃), barit (BaSO₄) gibi mineraller bir arada bulunabilirler.

Tuvenan Cevher: Maden sahasından çıkarılmış fakat üzerinde hiçbir cevher hazırlama işlemi yapılmamış cevhere denir. Kıymetli ve kıymetsiz mineraller karışımıdır.

Zenginleştirme (konsantrasyon): Bir tuvenan cevheri oluşturan kıymetli ve kıymetsiz minerallerin birbirinden ayrılması işlemine denir.

Konsantre: Bir zenginleştirme işlemi sonucu elde edilen ve çoğunlukla kıymetli element ya da kıymetli mineralleri içeren ürüne denir.

Artık (gang): Bir zenginleştirme işlemi sonucu elde edilen ve çoğunlukla kıymetsiz element ya da kıymetsiz mineralleri içeren ürüne denir.

Tenör: Bir tüvenan cevher, bir konsantre veya bir artıktaki bulunan kıymetli element, mineral veya bileşik yüzdesine denir. Tüvenan krom cevheri tenörü % 20 Cr₂O₃, krom konsantresi tenörü % 50 Cr₂O₃ ve krom artık tenörü % 2 Cr₂O₃ gibi.

Serbest tane: Tek bir mineral veya mineral grubundan oluşan tanelere denir.

Bağlı tane (bileşik tane): Birbirinden ayrılması istenen kıymetli ve kıymetsiz minerallerin bir arada buldukları taneler denir.

Serbestleşme: Bağlı tanelerin bölünerek (parçalanarak) serbest taneler haline gelmelerine denir.

Kırma: Tane boyutunu küçültmek için uygulanan işlemler denir. 10 cm'den iri ise İri Kırma, 10-0,5 cm arası ise İnce Kırma denir.

Öğütme: Tane boyutunun küçültülerek 10 mm'nin altına indirilmesine denir. 25 – 1 mm arası ise İri Öğütme, 1 mm – 1 mikron arasında ise İnce Öğütme denir.

Eleme: Kırma ve öğütme sonucu elde edilen ürünleri boyuta göre ayırma işlemine denir.

Klasifikasyon: Değişik şekli ve değişik tane boyutlu, farklı yoğunluklu tanelerin durgun ya da hareketli akışkan bir ortam içinde çöktürülmesi işlemine denir.

Konsantre verimi (randımanı): Bir ayırma işlemi sonucu elde edilen konsantrenin ağırlığının ayırmaya giren tüvenan cevherin ağırlığına olan oranına denir.

Kıymetli element verimi (randımanı): Bir ayırma işlemi sonucu elde edilen üründeki kıymetli element ağırlığının, tüvenan cevherdeki kıymetli element ağırlığına olan oranına denir.

Yüzey Büyültme (Boyut Küçültme)

Katı maddelerin mevcut yüzeylerinin büyütülmesi, tane boyutlarının küçültülmesiyle gerçekleşir. Boyut küçültmenin amaçları olarak: tane serbestleşmesini sağlamak; belirli bir zenginleştirme işlemi için uygun tane boyutlu malzeme hazırlamak; belirli bir proses için uygun tane boyutuna malzemeyi indirmek; nakliyede kolaylık sağlamak; bir malzemenin yüzey alanını büyültmek (çözündürme işleminde olduğu gibi çözeltiye geçebilme hızını arttırmak) sayılmaktadır. Tane boyutu belirlenmesinde en yaygın kullanılan, tanelerin geçebildiği ya da geçemediği delik açıklıklarına göre belirlemektir. (- 6 mm) tanelerin tamamının geçebildiği en küçük delik açıklığı; (+ 10 mm) tanelerin tamamının geçemediği en büyük delik açıklığı; (- 4 mm + 1 mm) tanelerin tamamı 4 mm'den geçmekte tanelerin tamamı 1 mm'nin üzerinde kaldığını göstermektedir. Bir cevheri 20 mm'ye indirmek demek, o cevherin bütün tanelerini 20 mm'den geçebilecek duruma getirmek demektir.

Boyut küçültme aracına beslenen malzeme boyutunun, boyut küçültme aracından çıkan malzeme boyutuna olan oranına “boyut küçültme oranı” denir. 100 cm boyutlu malzeme kırılarak 20 cm'ye indiriliyorsa boyut küçültme oranı $100/20= 5:1$ dir.

Boyut küçültme işlemlerinde harcanan enerjinin hesaplanmasında üç adet teori bulunmaktadır: Rittinger Teorisi, Kick Teorisi ve Bond Teorisi. Boyut küçültme aracına giren malzemenin %

80'inin geçtiği elek açıklığı d_1 , araçtan çıkan malzemenin % 80'inin geçtiği elek açıklığı d_2 olarak isimlendirilirse, boyut küçültme için gerekli enerji:

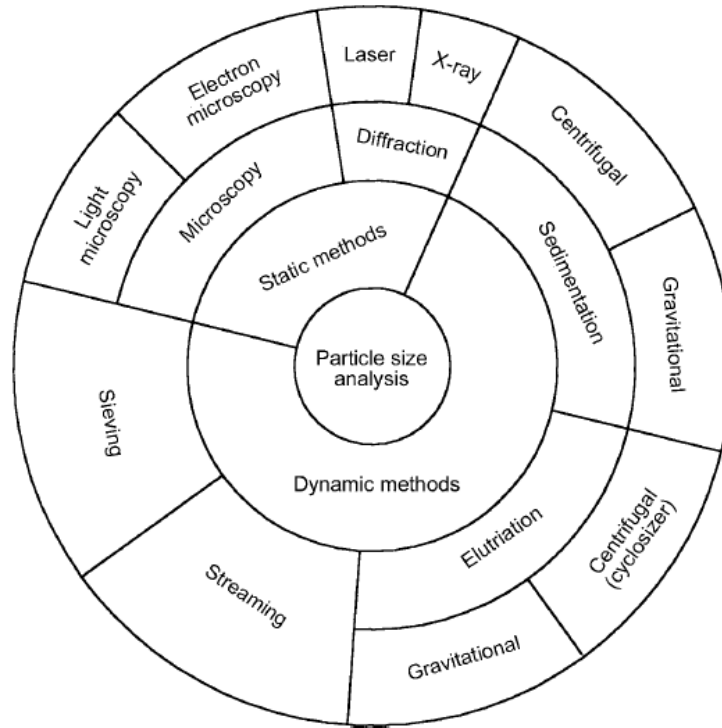
- Rittinger'e göre $(1/d_2 - 1/d_1)$ ile;
- Kick'e göre (d_1/d_2) ile;
- Bond'a göre $(1/\sqrt{d_2} - 1/\sqrt{d_1})$ ile orantılıdır.

Bugün boyut küçültme işlemlerinde harcanan enerji en çok Bond formülü ile hesaplanmaktadır.

$$W = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d_2}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}} \right) \text{ (Bir ton kırılan malzeme için)}$$

W : boyut küçültmede ton başına harcanan enerji (kW.saat/ton); W_i : İş indeksi (kW.saat/ton); d_1 : boyut küçültme aracına giren malın % 80'inin geçtiği elek açıklığı (mikron); d_2 : boyut küçültme aracından çıkan malın % 80'inin geçtiği elek açıklığı (mikron).

Tane boyutu tayini için bir çok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler kabaca iki grupta incelenebilir: statik metotlar ve dinamik metotlar. Şekil 3'te tane boyutu analiz metotları verilmektedir.



Şekil 3. Tane boyutu analiz metotlarının sınıflandırılması.

Tane boyu küçültme işlemlerinin seçimi sırasında birçok farklı değişken veya faktör etkili olmaktadır. Malzemenin sertliği ve mekanik yapısı ile malzeme bünyesindeki nem içeriği gibi fiziksel özellikler makine seçimi sırasında yardımcı olmaktadır. Malzemenin sertliği makinenin boyutu ve tasarımını etkiler, malzemelerin kırılabilmesi için seçilen makinenin yeterli mukavemette olması gerekmektedir. Sert malzeme demek yüksek abrasiv aşınma demektir ve makinenin tasarımında olabildiğince çok az miktarda aşınabilen parça olmalıdır. Minerallerin sertlik değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Minerallerin sertlik değerleri.

Moh's Sertlik Değeri	Mineral İsmi	Mikrosertlik
1	Talk – $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$	2,4
2	Alçı taşı – $Ca(SO_4).2H_2O$	36
3	Kalsit – $CaCO_3$	109
4	Florit – CaF_2	189
5	Apatit – $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl)$	536
6	Feldspar – $K(Si_3AlO_8)$	795
7	Kuvars – SiO_2	1130
8	Topaz – $Al_2(SiO_4)(F.OH)_2$	1427
9	Korundum – Al_2O_3	2060
10	Elmas - C	10060

Mekanik yapının önemini vurgulamak için örnek olarak lifli yapıya sahip bir malzemenin işlenmesi verilebilir. Lifli yapıya sahip malzeme (odun) basınçla veya kesme ile kırılmazken lime lime edilebilir. Lifli malzemeler için kullanılan makinelere ufalayıcı (disintegrators) adı verilmektedir. Nem de ayrıca kırma ve öğütme makinelerinin seçimi için önem teşkil etmektedir. Nem içeriğinin % 4-5'ten fazla olduğu durumlarda malzeme yapışkan bir yapıda olmakta ve serbest kırma için uygun olmamaktadır. Aksi durumlarda, nem içeriğinin % 50'ye ulaştığı durumlarda, malzeme oldukça akışkan yapıda olmakta ve kırma işlemleri sonrasında ki yıkama ve taşıma kademelerinde yardımcı olmaktadır.

Malzemelerin inceliği makine seçimini etkilemektedir. Hem beslenen malzemenin hem de ürünlerin tane boyutları bu seçimde etkilidir. Bazı makineler sadece kaba malzemeleri bazıları ise sadece ince tane boyutundaki malzemeleri işlemek için tasarlanmıştır. Bazı makineler düzenli ürünler üretirken bazılarında ise ürün boyutları çok çeşitlilik göstermektedir.

Malzemenin tonajı da ekonomik açıdan (sabit giderler ve çalışma maliyeti) çok önemlidir. Yüksek tonajlı sahalarda ilk yatırım maliyetleri çok yüksek olmasına karşın, enerji ve bakım gibi işletme maliyetlerinde önemli ölçüde azalma meydana gelmektedir.

Malzemelerin kimyasal reaktiflikleri tane küçültme işlemleri için sorun teşkil etmektedir. Örneğin tesisin yapısı bile korozyona maruz kalabilir. Tane küçültme işlemleri malzemelerin sıcaklıklarını genellikle arttırmakta ve bu durum malzemeleri istenmeyen yönde etkilemektedir.

İdeal bir kırıcı veya öğütücü (i) geniş kapasiteye sahip olmalı, (ii) birim ürün başına gerekli enerji çok az olmalı, (iii) istenen tane boyutunda ve dağılımında ürünlerin eldesini mümkün kılmalıdır. Boyut küçültme ilk aşamasında, partiküllerin geniş olduğu durumda, partikül başına düşen kırılma enerjisi oldukça yüksek olmakta, fakat birim kütle başına düşen enerji az olmaktadır. Bu kaba partikülleri işleyen kırıcılar oldukça büyük ve yapısal olarak sağlam olmalıdır. Tane boyutu azaldıkça, partikül başına düşen kırılma enerjisi azalmakta, ancak birim kütle başına düşen enerji çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu durum daha ince tane boyutlarına inildikçe boyut küçültme operasyonlarının enerji gereksinimlerinin artmasına neden olmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda, kademe kademe kırma ve öğütmenin tek bir seferde tek bir makine kullanılarak tane küçültmede kullanılmasına nazaran çok daha verimli olduğunu göstermektedir. Tane küçültme makineleri birçok farklı şekilde olmaktadır. Temel olarak; kırıcılar, öğütücüler, ultra-

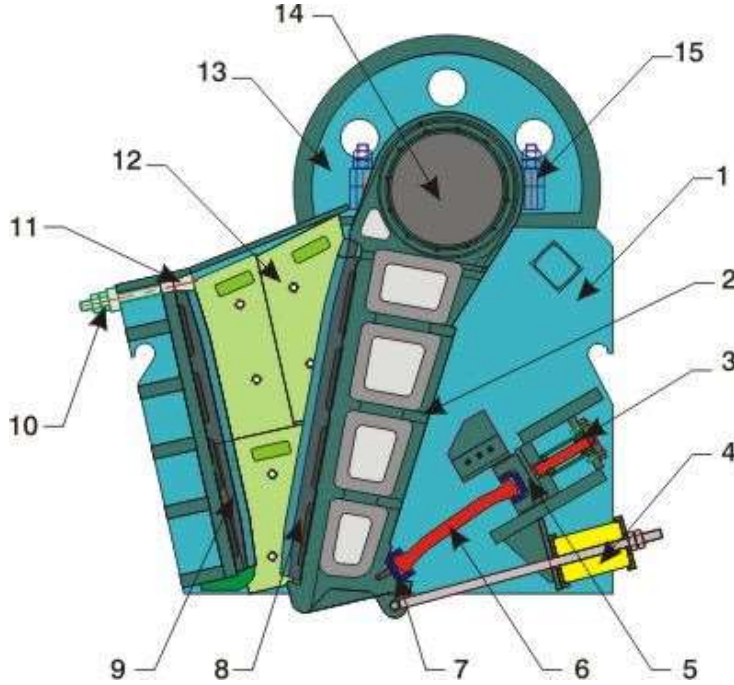
ince öğütücüler ve kesme makineleri olarak gruplandırılabilirler. Çizelge 5’te tane küçültme makinelerinin türleri verilmiştir.

Çizelge 5. Tane küçültme makine çeşitleri.

Kırıcılar (İri ve İnce)	Öğütücüler (İri ve İnce)	Ultra-İnce Öğütücüler	Kesme Makineleri
1. Çeneli Kırıcılar 2. Konili Kırıcılar 3. Merdaneli Kırıcılar	1. Çekiçli (Darbeli) Öğütücü 2. Döner-basınçlı Öğütücü 3. Aşındırmalı Öğütücü 4. Döner Öğütücü a) Çubuklu değirmen b) Bilyeli değirmen c) Borulu değirmen	1. Çekiçli öğütücü 2. Akışkan enerjili öğütücü	1. Bıçaklı kesici, doğrayıcı, dilimleyici

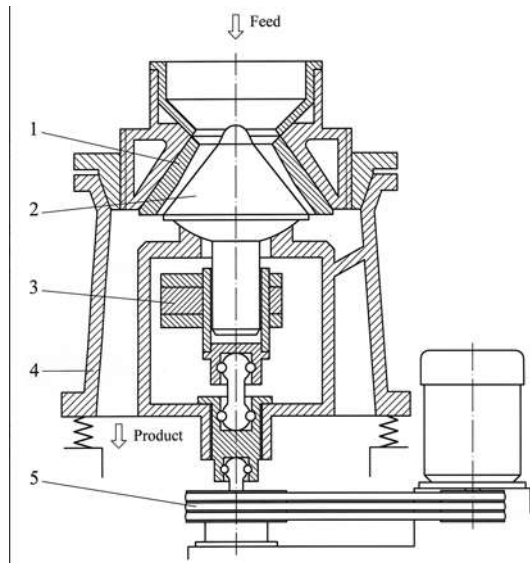
Kırma: Katı bir maddenin mekanik kuvvetler vasıtasıyla daha küçük parçalara bölünmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Kırmanın amacı belli bir parça boyutuna inmek fakat pek çok durumda belirli bir alt sınırı da aşmamaktır. Katı bir parçaya uygulanan kuvvet, parçacıklar arasındaki kohezyon kuvvetini yenmek ve yeni yüzeylerin teşekkülü ile artan yüzey enerjisini karşılamak için bir iş yapar. Kırma işi için harcanan toplam fiziksel güce karşı yüzey enerjisindeki artış çok çok küçüktür. Gücün asıl büyük bölümü şekil değiştirme ve sürtünme işleri için harcanmaktadır. Teknolojide kırma işlemi Kaba Kırma (10 cm’den büyük) ve İnce Kırma (10cm-5mm) diye ikiye ayrılır. Genellikle kırma işleminde basınç, darbe ve çarpma metotları uygulanmaktadır. En çok kullanılan kırıcılar “Çeneli” ve “Konik” kırıcılardır. Bu iki tip kırıcı sert ve orta sertlikteki maddelerin hem kaba hem de ince kırma işlemlerinde başarı ile uygulanırken, yumuşak maddelerin kaba kırmasında “Çekiçli” kırıcılara daha fazla rastlanılmaktadır. Orta sertlikteki maddelerde “Merdaneli” kırıcıların da kullanıldığı görülmektedir. İnce kırma işlemlerinde bu 4 tür kırıcı da kullanılmaktadır.

“Çeneli” kırıcılarda (Jaw Crusher) kırma işlemi, cihazın çene tabir edilen parçaları arasında yapılmaktadır. Bu çenelerden genellikle birisi sabit olmakta diğer çenenin hareketi ile kırma gerçekleşmektedir. Oynar çenenin düz, düz-kavisli ve kavisli tipleri mevcuttur. Boğaz açıklığı, salınım genliği ve hız değiştirilerek kapasite ayarlanmaktadır. Özellikle kaba kırmalarda kullanılır. Çeneli kırıcının şematik gösterimi Şekil 4’te verilmiştir.



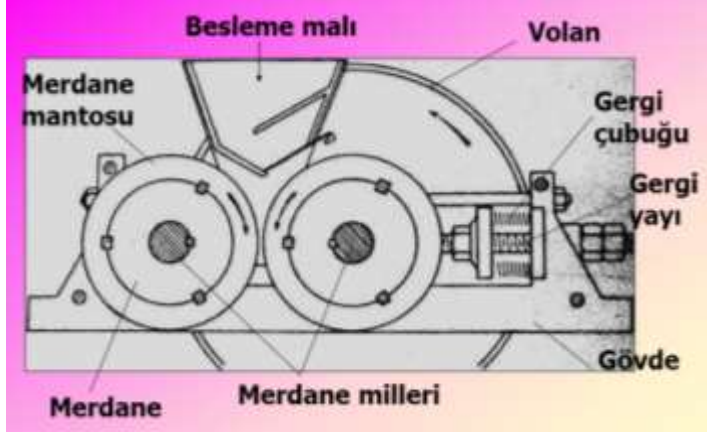
Şekil 4. Çeneli kırıcının şematik görünümü (1 .Kırıcı Gövdesi, 2.Pitman, 3.Hidrolik Çene Ayar Mekanizması, 4.Takoz Mekanizması, 5.Ayar Bloğu, 6.Emniyet Plakası, 7.Emniyet Plakası Yuvası, 8.Hareketli Çene, 9.Sabit Çene, 10.Sıkma Cıvatası, 11 .Sıkma Kaması, 12.Yan Astar Plakası, 13.Volan + Kasnak, 14.Eksantrik Mil, 15.Yatak Grubu)

“Konili” kırıcılarda (Cone Crusher) kırma konik yüzeyler arasında yapılmaktadır. Sabit bir gövde içerisinde bir mil etrafında hareketli göbek arasında kırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Göbek konkav, düz veya kavisli şekillerde olabilmektedir. Konkavlar ve göbek arasında kalan koni içerisinde, boğaz açıklığı, salınım genliği ve hız değiştirilerek çeşitli kapasitelerde çalışmaktadır. Konili kırıcının şematik gösterimi Şekil 5’te verilmiştir.



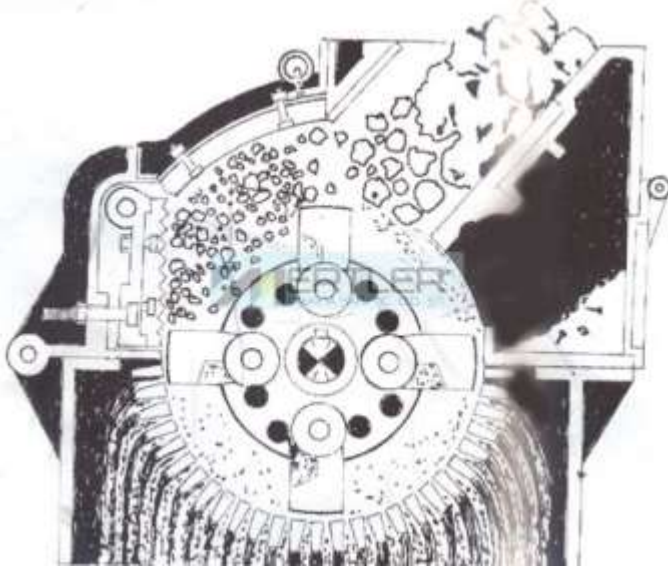
Şekil 5. Konili kırıcının şematik görüntüsü (1. Dış gövde konisi, 2. Hareketli iç koni, 3. İç koni altına bağlı ağırlık, 4. Dış gövde, 5. İç koniyi hareket ettiren motor)

“Merdaneli” kırıcılar (Roll crusher) yatay ve paralel eksenler etrafında zıt yönlerde dönen iki merdane arasında sıkışan maddelerin basınç kuvveti ile kırılması esasına dayanır. Bunlardan sabit ve yaylı tipi olanları vardır. Kapasite merdaneler arası açıklık ve hız değiştirilerek ayarlanır. Bu merdaneler özellikle ince kırmada kullanılır. Merdaneli kırıcının şematik çizimi Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Merdaneli kırıcının şematik gösterimi.

“Çekiçli” kırıcılar (hammer mill) kırmayı doğuran hareketin darbe şeklinde oluşuyla belirlenir. Sabit çarpma plakaları ve yatay bir eksen etrafında dönen göbek ve göbeğe bağlı çekiçlerden oluşan bir yapıdadır. Çekiç adedi ve şekli, çarpma plakaları adedi, tertibi ve şekli ile hız kapasiteyi etkileyen faktörlerdir. Çekiçli kırıcının şematik gösterimi Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Çekiçli kırıcının şematik gösterimi.

Öğütme: Üretilen parçacıkların en büyük boyutunun yaklaşık 5mm’den daha az olduğu hallerdeki yüzey büyütme işlemine öğütme denilir. Teknolojide farklılık gösterse de, genellikle 5-0,5 mm boyutları Kaba Öğütme, 500-50 mikron boyutları İnce Öğütme, 50-5 mikron boyutları Çok İnce Öğütme, 5mikrondan az boyutlu olanlar Kolloid Öğütme şeklinde sınıflandırılabilir. Öğütme

işlemi, öğütülecek maddenin özelliklerine ve kullanılan değirmene bağlı olarak kuru, yaş veya hem kuru hem yaş olarak yapılabilir. Değirmenlerde öğütücü yüzeylerin birbirine temasını ancak araya giren parçacıklar önler, aksi halde bu yüzeyler temas halinde olurlar. Yapısal özelliklerine göre öğütücüler dört grupta toplanmaktadır:

- Aktarılan ortamla çalışan değirmenler,
- Sabit bir yörünge üzerinde yuvarlanan merdaneler,
- Dönen diskler,
- Sabit bir yüzey üzerine düşen tokmaklar.

Tüm öğütme işlemlerinde kullanılan ve bu yüzden universal bir karaktere sahip bulunan öğütücüler aktarılan ortamla çalışmaktadır. Aktarılan ortama göre bu değirmenler Bilyalı, Çubuklu, Çakıllı değirmenler olarak isimlendirilirler. Aktarılan ve öğütmeyi sağlayan ortam öğütülecek malzemenin kendisi ise (örneğin iri cevher parçaları) öğütmeye Otojen öğütme, bu tip öğütücülere de Otojen değirmenler denir. Şekil 8’de bilyalı değirmenin şematik görüntüsü verilmiştir.

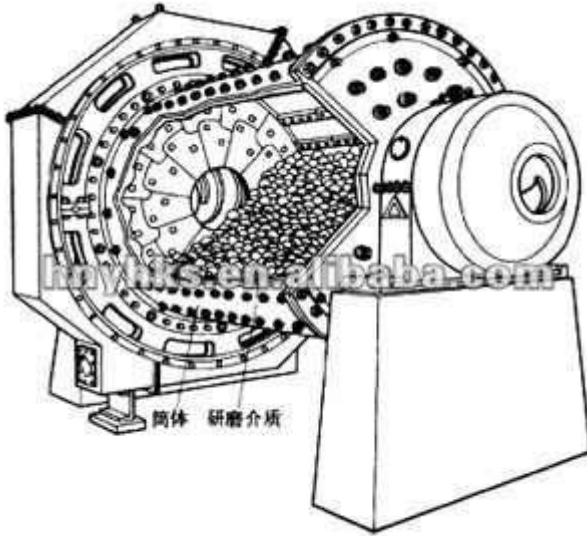


图2 球磨机

Şekil 8. Bilyalı değirmen.

Aktarılan ortamla çalışan değirmenler eksenini etrafında dönen bir gövde ve içerisine konan öğütücü ortam parçalarından (bilya, çubuk, çakıl, iri parçalı madde) oluşur. Gövdenin dönüş hızına bağlı olarak öğütücü parçalar kayarak yuvarlanabilir, serbest düşebilir ve kendi eksenini etrafında dönebilir. Bu hareketlerin toplam bileşkeni öğütme olayını etkileyen ana karakteristiktir. Öğütme homojen olmayan kayalarda kıymetli mineral – gang ayırımını ve kıymetli mineralin serbest hale geçmesini sağlayan önemli bir ön işlemdir. Altın-gümüş cevherlerinin siyanür çözümlendirmesi kıymetli mineralin serbestleşmesi yanı sıra reaksiyon hızı – reaksiyon yüzeyi doğru oranıtısı nedeni ile öğütme önemlidir. Cevher hazırlamanın özellikle çok ince dağılımlı kompleks cevherlere uygulanan flotasyon tekniği de yüzey büyültmenin gerekli ve şart olduğu bir çalışma sahasını gösterir.

Çubuklu değirmenler iri öğütmede, bilyalı değirmenler ince öğütmede kullanılırlar. Genellikle çubuklu değirmenler 25 mm – 0,5 mm arasında; bilyalı değirmenler ise 1 mm’den daha küçük boyutlarda kullanılır. Genellikle çubuklu değirmenler Açık devre (öğütülen madde değirmenden direk ayrılır), bilyalı değirmen Kapalı devre (değirmen çıkışında bir ayırıcı elek sistemi

bulunmakta elek üzerinde malzeme tekrardan değirmene beslenir) çalıştırılırlar. Yaş öğütmede enerji sarfiyatı kuru öğütmeye nazaran daha azdır (%40-50); öğütücü ortam miktarı değirmen iç hacminin % 40-50'si kadardır; birim değirmen hacmi ve birim öğütücü ortam ağırlığına göre kapasite kuru öğütmeye göre daha fazladır; kuru öğütmeye nazaran daha yüksek değirmen hızı kullanılır. Kuru öğütmede astar ve öğütücü ortam sarfiyatı yaş öğütme sarfiyatının % 10-25'i kadardır; öğütücü ortam miktarı değirmen iç hacminin % 35-45'i kadardır.

Otojen öğütmede bilya, çubuk, çakıl gibi öğütücü sarfiyatı yoktur. Bilyalı, çubuklu, çakıllı değirmenlere malzeme beslenmeden en az 25 mm'ye kırılması gerekirken; otojen öğütmede zaten iri cevher parçaları gerektiğinden hiç kırma yapılmaz veya çok az yapılır. Bu bakımdan otojen öğütmede cevherin ön kırma masrafları yoktur. Otojen öğütmede tek kademedede 25 cm'den 0,1 mm'ye kadar boyut küçültme sağlanabilir. Otojen öğütmede kırma ve öğütme bir arada yapıldığı için kapasite diğer değirmenlere nazaran düşüktür. Otojen öğütme ancak belirli özellikteki cevherler uygulanabilir: yeterli miktarda iri cevher parçası bulunmalı; iri cevher parçaları yuvarlak veya yuvarlağa yakın şekilli olmalı; iri parçalar orta sertlikte olmalı ve çabuk ufalanmamalıdır.

Malzeme Ayırma

Kırma ve öğütme işlemleri homojen maddelerde sadece yüzey büyültme maksadıyla, homojen maddelerde ise minerallerin serbestleşmesi ve buna bağlı yüzey büyültme amacıyla yapılmalarına rağmen bu işlemler sonucunda elde edilen ürün hem fiziksel yapı hem de bileşim açısından karışık bir görünüştedir. Belli boyut sınırları arasındaki malzemenin daha büyük ve daha küçük boyutlarından veya belli minerallerin diğerlerinden ayrılması her yüzey büyültme işleminden sonra gerekli bir çalışmadır. Metalurjide kullanılan malzemeler katı, sıvı, gaz hallerinde bulunabilirler veya yapılacak işlemin sıvı ve gaz ortamda gerçekleşmesi gerekebilir.

Katı maddelerin kaba kırma sonucu kısmen serbestleşmiş durumda renk farkına dayanılarak elle ayrılması "Tavuklama" küçük çapta halen uygulanmakta olmasına rağmen endüstriyel çalışmalar dışında tutulmaktadır. Endüstriyel çapta malzeme ayırma: parça büyüklüğü, özgül ağırlık, manyetik özellik, elektrostatik özellik ve yüzeysel özelliklere ve bu özellikler arasındaki malzemelerdeki farklılıklara göre çeşitli yöntemler kullanılarak yapılmaktadır.

Çeşitli tanelerin karışımından oluşan bir malzemede, taneleri büyüklüklerine göre birbirinden ayırmaya "Boyuta göre ayırma" denir. Boyuta göre ayırma iki şekilde yapılabilir: Eleme ve Sınıflandırma (klasifikasyon).

Eleme: Tanelerin belirli bir büyüklükteki delik veya açıklıklardan geçebilme veya geçememe özelliğine dayanılarak yapılan bir boyuta göre ayırma işlemidir. Eleme için kullanılan araçlara elek denir. Bir eleğin delikler (açıklıklar) bulunan kısmına Elek yüzeyi; elek yüzeyinin üzerindeki deliklere (açıklıklar) Elek açıklığı denir. Eleme ile elek artı ve elek üstü olmak üzere iki ürün elde edilir. Bu işlem kırma işlemlerinde iri parçaları ayırarak devreye geri göndermek, ince parçaları ayırarak daha fazla ufalanmalarına engel olmak gibi ara veya belli boyut sınırları arasında kalındığını saptamak gibi temel hedeflere yöneltilir. Eleme ile bir ayırımın gerçekleşebilmesi için tanelerin birbirlerinden serbest halde olmaları fakat mekanik hareketlerle birleşip topaklanmalarını şartı aranır. Tanelerin serbest halde olmaları kıymetli mineral ile gang arasında mevcut sertlik, kırılabilirlik gibi fiziksel özelliklere bağlı olup, kırma ve öğütmenin hangi mertebede yapılmasını belirler. Endüstriyel elekler elemanın yapıldığı yüzeyin sabit veya hareketli olmasına göre iki ana bölüme ayrılır.

Sabit eleklerin en basit şekli ızgaralardır. ızgaralar büyük boyutlu malzemelere en uygun tiptir. Genellikle eğik olarak yapılırlar ve üzerlerindeki malzemenin aşağı doğru inerken ızgara aralıklarından düşen parçaların ızgara üstünde kalandan ayrılmasını sağlar. Hareketli eleklerde tıkanma gibi olayları azaltmak için ızgaralar çeşitli hareketler verilmektedir. Bu hareketler ile malzeme hem bir yöne doğru itilir hem de eleme kolaylaştırılmış olur. Tambur elekler bu tipin en gelişmiş modelleridir. Dönen ve sarsıntılı eleklerle nazaran günümüzde titreşimli elekler daha fazla kullanılmaktadır. Endüstriyel işlemlerde eleme yaş veya kuru olmak üzere iki şekilde de yapılmaktadır.

Eleme aynı zamanda önemli bir laboratuvar tekniğidir. Verilen bir numunedeki çeşitli boyutlardaki malzemenin göreceli miktarının ölçülmesi (elek analizi) uygulanacak öğütme yönteminin saptanmasını sağlar. Bu sebepten elekler belli standartlar göre belirlenmiştir. Birim alan başına mevcut delik adedine göre Meş (mesh) numarasıyla elek açıklıkları İngiliz, Amerikan ve Alman standartlarına göre belirtilmiştir. Bizim kullandığımız sistemde başlangıç noktası olarak 200 meş = 0,074 mm = 74 mikron'luk bir eleğin elek açıklığı kabul edilmiştir. Meş, 1 inç yani 25,4 mm uzunlukta bulunan aralık delik sayısı olduğuna göre; 200 meşlik elekte, eleğin 1 inç uzunluğunda 200 adet aralık delik bulunmakta ve bu aralıkların şekli ise kare şeklindedir. Karelerin bir kenar uzunluğu ise 74 mikrondur. Elek analizleri için elek açıklıklarının seçiminde kullanılan sabit oran $\sqrt{2} = 1,4142$ veya $\sqrt[4]{2} = 1,189$ 'dur. Tyler elek serisinde $\sqrt[4]{2}$ oranı belirlenirken, ASTM sisteminde $\sqrt{2} = 1,4142$ oranı kullanılmıştır.

Örnek olarak merdaneli kırıcıda 2 mm altına kırılmış 300 gram ağırlığındaki cevherin elek analizini yapalım. Önce elek analizi için kullanacağımız elek açıklıklarını seçmek gerekir. En iri elek 2 mm'den biraz küçük olan 1,651 mm aralık seçilecektir. Bu elekten sonra ise sırasıyla

$$1,651 : 1,4142 = 1,168 \text{ mm}$$

$$1,168 : 1,4142 = 0,833 \text{ mm}$$

$$0,833 : 1,4142 = 0,589 \text{ mm}$$

$$0,589 : 1,4142 = 0,417 \text{ mm}$$

0,417 : 1,4142 = 0,295 mm seçilecektir. En alta ise elek tavaşı dediğimiz deliksiz tava konur. Eleme bitince her elek üzerinde kalan ve elek tavaasına geçen en ince malzeme tartılır ve sonuçlar elek analiz çizelgesinde gösterilir. Çizelge 6'da elek analiz çizelgesi ve sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 6. Örnek elek analiz çizelgesi.

Elek Açıklığı (mm)	Miktar (g)	Miktar (%)	Toplam (%)	
			Elek Üstü	Elek Altı
- 2,000 + 1,651	15,3	5,1	5,1	100
- 1,651 + 1,168	60,0	20,0	25,1	94,9
- 1,168 + 0,833	60,9	20,3	45,4	74,9
- 0,833 + 0,589	43,8	14,6	60,0	54,6
- 0,589 + 0,417	35,4	11,8	71,8	40,0
- 0,417 + 0,295	24,9	8,3	80,1	28,2
- 0,296	59,7	19,9	100,0	19,9
Toplam	300	100		

Sınıflandırma: Temel görevi malzemelerin parça boyutlarına göre ayrılması ve sınıflandırılmasıdır. Aralarında boyut, özgül ağırlık veya şekil farkı olan tanelerin su veya hava gibi bir ortamda farklı hızlarda çökmelerinden yararlanılarak birbirinden ayrılması işlemine denir. Bu ayırım parçaların hava, su veya diğer akışkanlar içerisinde çökme hızının etkisiyle olur.

Boşlukta serbest düşen bir cismin hızı doğrudan yer çekimi ivmesi ve düşüş yüksekliği ile belirlenmektedir. Buna karşılık akışkan bir ortam içerisinde düşme halinde ise düşüş hızı cisim ile akışkan ortamın yoğunluklarına bağlı olarak farklıdır. Bu hızı etkileyen bir diğer faktör; düşen cismin yapısı ve şekli haricinde, akışkan ortamın viskozitesidir.

Basit geometrik bir yapıdaki (örneğin küresel) parçacığın (yoğunluğu ρ ve çapı d) yoğunluğu ρ_{ort} ve viskozitesi η_{ort} olan bir akışkan ortam içinde Laminar akış şartlarında düşüş hızı Stokes kanunuyla belirlidir: (burada g terimi yer çekimi ivmesini göstermektedir)

$$v = \left(\frac{2}{9}\right) \left(\frac{\rho - \rho_{ort}}{\eta_{ort}}\right) (g) \left(\frac{d^2}{4}\right)$$

Akışın turbulant olduğu şartlarda Rittinger kanunu geçerlidir ve hız yaklaşık olarak şu şekildedir:

$$v \cong \left[\frac{3d(\rho - \rho_{ort}) \cdot g}{\eta_{ort}} \right]^{1/2}$$

Parçacıkların birbirlerinden ayrı oldukları ve karşılıklı etkilenmenin bulunmadığı yukarıdaki eşitlikler serbest çökme için geçerlidir. Yoğunlukları farklı iki katı parçacığın bir akışkan içerisindeki çökmesinde ise serbest çökme oranından bahsedilmektedir. Yoğunlukları ρ_1, ρ_2 ve çapları d_1, d_2 olan parçacıklar için bu oran laminar akış için: $\frac{d_1}{d_2} = \left[\frac{\rho_2 - \rho_{ort}}{\rho_1 - \rho_{ort}} \right]^{1/2}$; turbulant akış için: $\frac{d_1}{d_2} = \frac{\rho_2 - \rho_{ort}}{\rho_1 - \rho_{ort}}$ eşitlikleriyle hesaplanır.

Engellenmiş çökme katı parçacıkların birbirinin çökmesine engel olabildikleri durumu belirler. Bu şartlarda ortamın yoğunluğu artık sadece akışkanın değil karışımın (akışkan+katı) ortalama yoğunluğu olmaktadır. Sınıflandırmanın temel amacı katı-katı ayırımından ziyade katının boyutuna göre sınıflandırılması olduğundan engellenmiş çökme oranlarının birime eşit olmaları arzulanır. Serbest çökme oranları eşitliklerinden kolaylıkla hesaplanacağı gibi laminar akış şartlarında d_1/d_2 oranı turbulent akış şartlarındaki çökme oranından daima küçüktür. Bu sebepten sınıflandırma işlemlerinin laminar akışta yapılması arzulanır (farklı minerallerin ayrılmasında ise turbulent akış ayırımının sağlanmasında faydalı olmaktadır).

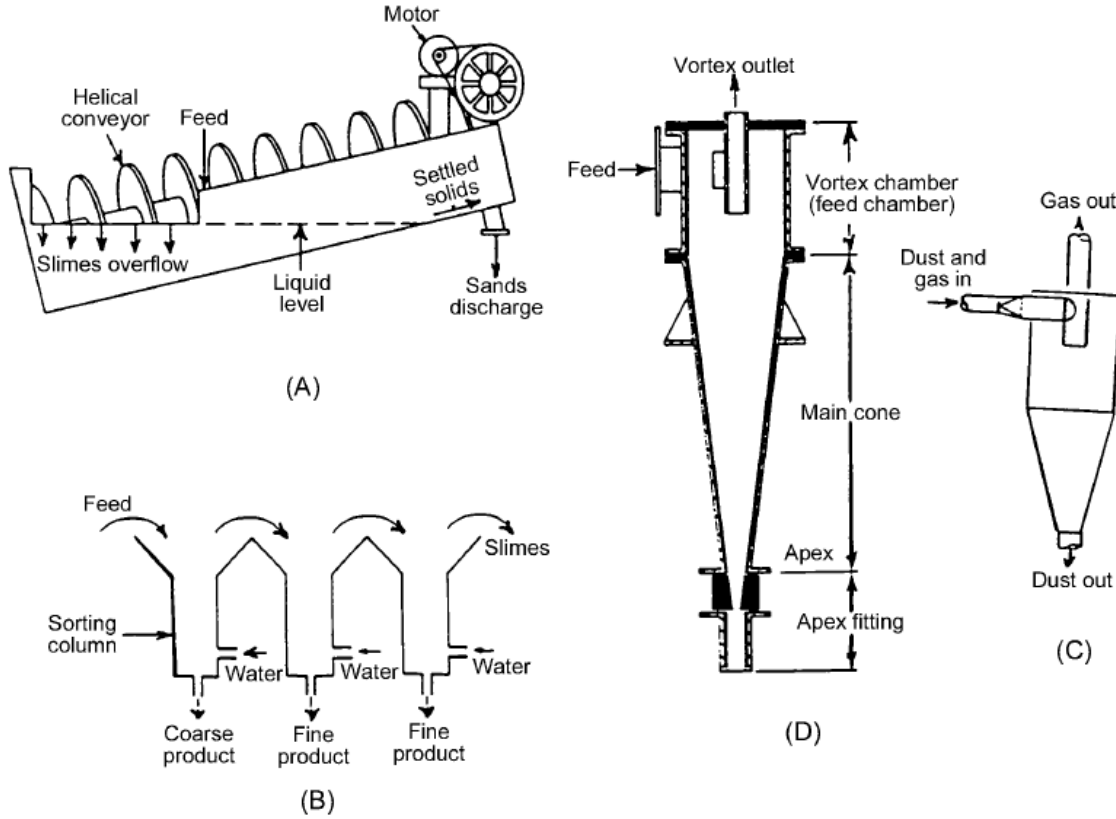
Sınıflandırma daha ziyade tane boyutuna göre ayırım yapmakta ve başlıca şu amaçlar için kullanılmaktadır: kapalı değirmen devrelerinde öğütme boyutundan iri taneleri tekrar değirmene vermek; zenginleştirme işlemleri için gerekli tane boyutlarında malzemeler hazırlamak; herhangi bir amaçla bir malzemenin irisini incesinden ayırmak. Sınıflandırmada geçerli olan bazı hususlar:

- Özgül ağırlığı ve şekli aynı olan iki taneden boyutu büyük olan daha hızlı çöker,
- Boyutu ve şekli aynı olan iki taneden özgül ağırlığı büyük olan daha hızlı çöker,
- Boyutu ve özgül ağırlığı aynı olan iki taneden yuvarlak olanı yassı olandan daha hızlı çöker,
- Bir tane yoğunluğu düşük olan bir sıvıda yoğunluğu yüksek olan bir sıvıdakinden daha hızlı çöker,

- Bir tane viskozitesi düşük olan bir sıvıda viskozitesi yüksek olan bir sıvıdakinden daha hızlı çöker.

Sınıflandırma yapmak için kullanılan araçlara klasifikatör denmektedir. Klasifikatörler yapıları ve çalışma şekilleri bakımından çok çeşitlidir: çöktürme havuzları, çöktürme konileri, hidrolik klasifikatörler, taraklı klasifikatörler, spiral klasifikatörler, siklonlar.

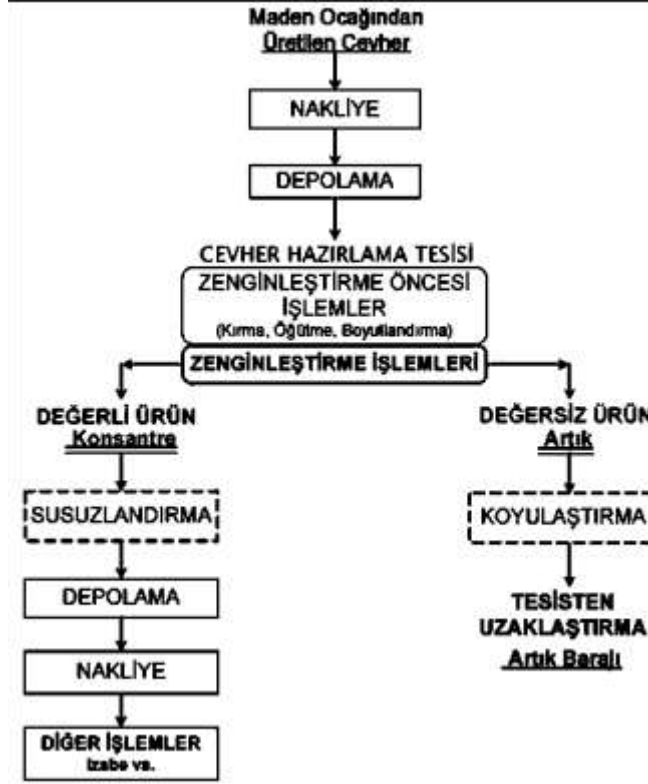
Çöktürme havuzları dikdörtgen prizması şeklindeki beton, sac veya ahşap malzemeden yapılmış havuzlardır. Burada katı tanesinin çökmesine etki eden kuvvetler; yer çekimi kuvveti, sıvının kaldırma kuvveti ve sıvının sürüklenme kuvvetidir. Çöktürme konileri tepesi aşağıda tabanı yukarıda olan ters koni şeklindedir. Beton, çelik, sac veya ahşaptan yapılabilirler. Hidrolik klasifikatörlerde bir katı tanesine yer çekimi kuvveti, sıvının kaldırma kuvveti, sıvının sürüklenme kuvvetine ilaveten çökme yönüne ters istikamette etki eden sıvı akımı kaldırma kuvveti ile birlikte 4 kuvvet etki eder. Düşey sıvı akımının hızı değiştirilerek belli özellikli tanelerin çökmesi veya taşması sağlanabilir. Taraklı klasifikatör yatay su akımlı mekanik bir klasifikatördür. Tank eğimi % 15-30 arasında olan bu klasifikatörlerde 0,589-0,074 mm tane boyutundaki malzemelerin ayrımı yapılabilmektedir. Spiral klasifikatör de yatay su akımlı mekanik bir klasifikatördür. Ancak çöken iri malzeme tarak yerine spiral adı verilen bir helezon şeklindeki mekanizma ile taşınır. Siklon üst kısmı silindirik, alt kısmı konik katı-sıvı karışım (pülp) girişi teğetsel olan içi boş bir gövdeden ibarettir. Taneleri hem boyut farkına hem de yoğunluk farkına göre ayırır. İri boyutlu ve yüksek yoğunluklu ağır taneler siklon altından elde edilir. Küçük boyutlu ve düşük yoğunluklu hafif taneler de siklon üstünden çıkarlar. Şekil 9'da bazı klasifikatörlerin şematik görüntüleri verilmiştir.



Şekil 9. A) Spiral klasifikatör, B) hidrolik klasifikatör, C) hidrosiklon, D) Siklon şematik görüntüsü.

Cevher Zenginleştirme

Cevher zenginleştirme, cevherin maden ocağında üretilmesinden itibaren başlamakta ve işlem elde edilen konsantrenin metal üretim tesisine nakline kadar devam etmektedir. Tüvenan bir cevherin metal üretim tesisi nakline kadar geçirdiği işlem kademeler Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. zenginleştirme işlemlerindeki kademelerin akım şeması.

Tüvenan cevherdeki değerli minerallerin serbest haline getirilmesi kırma, öğütme ve boyuta göre ayırma yani eleme ve sınıflandırma ile sağlanmaktadır. Boyut küçültme işlemleri ile yeterli ölçüde sağlanan serbestleşme sonucu, cevheri oluşturan mineraller özelliklerine bağlı olarak değişik yöntemlerle konsantre adı verilen ürün içerisinde toplanır. Değerli mineraller tek bir konsantre altında toplanabildiği gibi ayrı ayrı konsantreler halinde de üretilebilir. Cevher zenginleştirme işlemlerinde minerallerin fiziksel özelliklerinden (sertlik, gevreklik, renk veya parlaklık, özgül ağırlık, manyetik duyarlık, floresans veya fosforesans özellik, radyoaktivite), fiziko-kimyasal özelliklerinden (yüzey özellikleri, ara yüzey özellikleri) ve kimyasal özelliklerinden (termal özellik, farklı çözünürlük) yararlanılmaktadır.

Bir cevheri oluşturan minerallerin iri boyutta serbest kalanları aralarındaki özgül ağırlık veya renk farkına göre elle ayıklama veya gravite yöntemiyle zenginleştirilirken; daha ince boyutlarda gravite ve flotasyon yöntemleri uygulanabilmektedir. Manyetik duyarlık farkından yararlanılarak manyetik ayırma yöntemleri kullanılarak; çözünme farklılıklarından yararlanılarak kimyasal yöntemler kullanılarak zenginleştirme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Cevher zenginleştirme yönteminin seçiminde bu özelliklerin yanı sıra ekonomik açıdan uygulanabilir olması da gerekmektedir.

Örnek olarak 0,3 mm'den küçük boyutta serbest halde bulunan bir sahil kumu kuvars, rutil, ilmenit, zirkon ve monazit minerallerini içermektedir. Bu minerallerin ayrı ayrı konsantreler halinde elde edilebilmeleri için gerekli zenginleştirme yöntemini belirleyelim. Minerallerin özellikleri Çizelge 7'de verilmiştir.

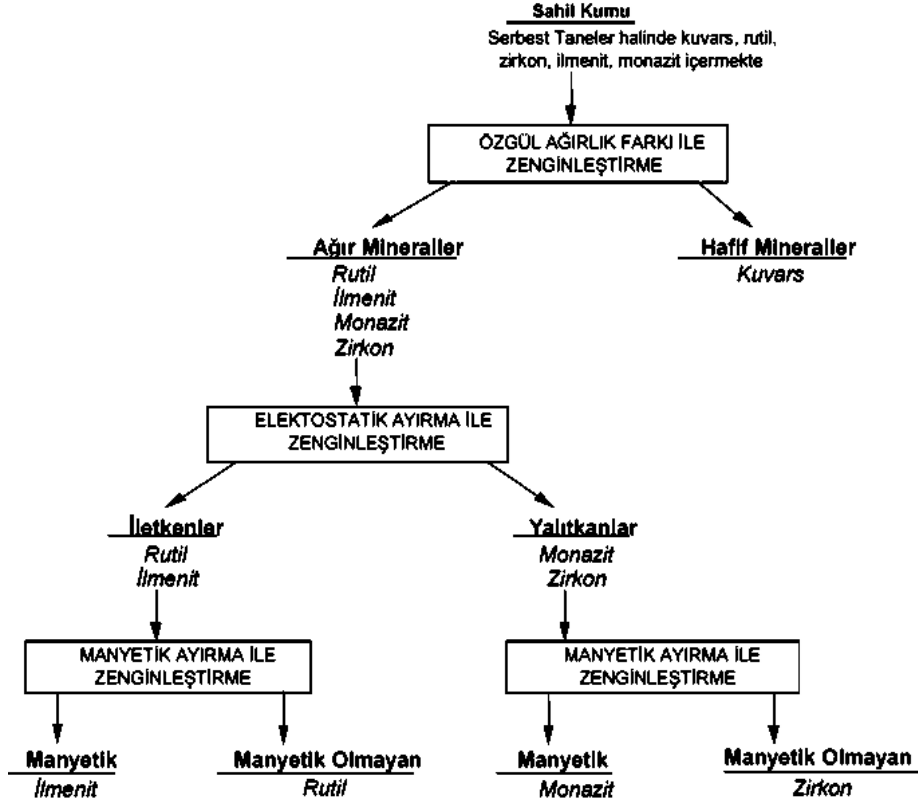
Çizelge 7. Sahil kumunda yer alan minerallerin belli başlı özellikleri

Mineral adı	Kimyasal Formül	Renk	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Manyetik duyarlılık (SI)	Elektrik iletkenlik	Radyoaktivite	Sertlik (Mohs)
Kuvars	SiO ₂	Beyaz	2,65	Diamanyetik (- 0,2)	Yalıtkan	-	7,00
Rutil	TiO ₂	Kahve	4,20	Paramanyetik (+ 0,2)	İletken	-	6,25
İlmenit	FeTiO ₃	Siyah	4,75	Paramanyetik (+ 162)	İletken	-	5,50
Zirkon	ZrSiO ₄	Beyaz	4,70	Diamanyetik (- 0,3)	Yalıtkan	Bazen radyoaktif	7,50
Monazit	(La,Ce,Th)PO ₄	Kırmızı - Kahve	5,10	Paramanyetik (+ 15)	Yalıtkan	Radyoaktif	5,25

Yukarıdaki çizelgeye göre şu farklılıklar tespit edilebilir:

- Kuvars ve zirkon beyaz diğer üçü renklidir,
- Yalnızca monazit radyoaktiftir,
- Kuvars ve zirkon diamanyetiktir. Rutil, ilmenit ve monazit paramanyetik olup aralarındaki manyetik duyarlılık farkları çok fazladır,
- Kuvars, zirkon ve monazit yalıtkan, diğer ikisi iletkenidir,
- Yalnızca kuvarsın özgül ağırlığı düşük, diğerleri kabaca aynı seviyedir.

Bu örneğe göre en çok kullanılan yöntemlerin meydana getirdiği proses akış şeması Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Sahil kumu proses akış şeması.

Bir zenginleştirme işlemi sonucunda genellikle biri konsantre (concantrate) diğeri artık (tailing) olmak üzere iki ürün alınmakta, bazen bu ürünlerin dışında bir de ara ürün (middling) alınabilmektedir. Zenginleştirme işlemi tek veya çok kademeli olabilmektedir. Zenginleştirme işlemlerinin denetimi elde edilen ürün miktarlarının tespit edilmesi ve kimyasal analizlerinin yapılarak değerli metal yüzdelerinin bulunması sonucunda yapılır. Sonuçların değerlendirilmesi “Metalürjik denge çizelgesi” veya zenginleştirme formülleriyle yapılmaktadır.

Zenginleştirme devresine beslenen cevher ağırlığının elde edilen konsantrenin ağırlığına olan oranına zenginleştirme oranı denir. Zenginleştirme işlemi sonucunda elde edilen konsantrenin içinde bulunan metal (element) miktarının zenginleştirme devresine beslenen tüvenan cevher içindeki toplam metal (element) miktarına olan oranına ise metal kazanma verimi denir. Zenginleştirme işlemi sonucunda elde edilen ürünlerin miktar ve değerli metal yüzdelerinin gösterildiği çizelgeye metalürjik denge çizelgesi denir. Bu çizelge üzerinde ayrıca değerli element veya metalin ürünlere göre dağılımı da verilmektedir.

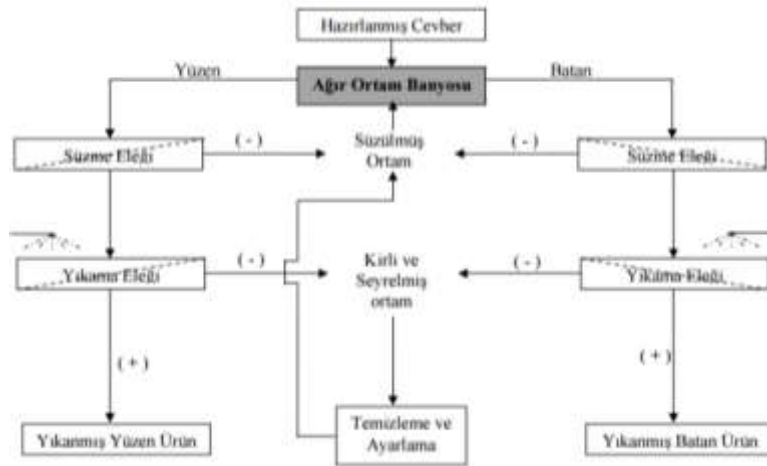
Örnek: Bir çinko sülfür (sfalerit) flotasyon tesisinde zenginleştirme işlemine günde 600 ton tüvenan cevher beslenmektedir. Alınan çinko konsantresinin miktarı 65 ton olup tenörü % 52,8'dir. Artık olarak atılan pastanın tenörü % 0,6 Zn'dir. Buna göre metalürjik denge tablosunu çizip, zenginleştirme oranını hesaplayınız.

Ürünler	Miktar (ton)	Miktar (%)	Zn Ağ. (%)	Zn Ağ. (ton)	Zn verim (%)
Konsantre	65	10,8	52,80	34,32	91,45
Artık	535	89,2	0,60	3,21	8,55
Tüvenan cevher	650	100,0	6,25	37,53	100,00

Zenginleştirme oranı: $Z = 600 / 65 = 9,2$ 'dir.

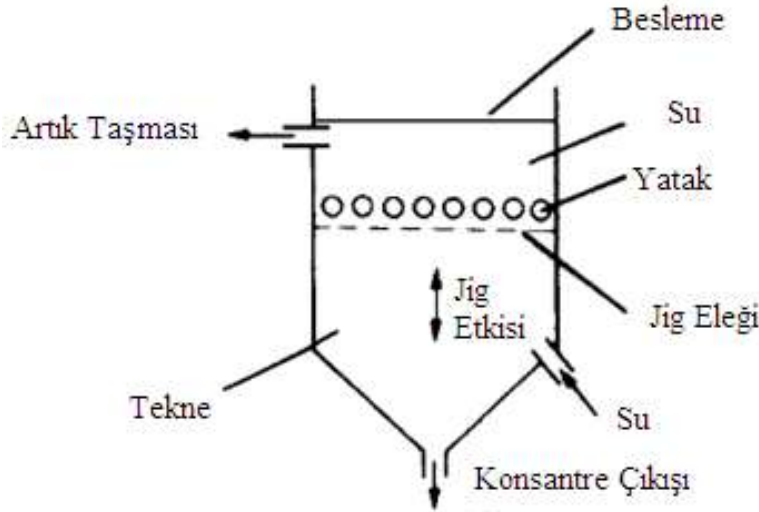
Özgül Ağırlık Farkı (Gravite) ile Zenginleştirme: Mineral tanelerinin akışkan bir ortam içinde özgül ağırlık farkından dolayı değişik şekilde hareket ederek birbirlerinden ayrılması ile gerçekleşen işleme Gravite Zenginleştirme denir. Gravite zenginleştirmesinde mineral tanelerinin akışkan ortam içindeki hareket hızları ve özgül ağırlığının yanı sıra minerallerin şekli, büyüklüğü, akışkan ortamın vizkozitesi ve özgül ağırlığı da önemlidir. Özgül ağırlık farkı ile zenginleştirmede üç türlü akışkan ortam kullanılmaktadır: durgun ortam (ağır ortam); düşey hareketli ortam (jig); tabaka halinde eğimli akan ortam (sarsıntılı masa, spiral, oluk).

İri boyutlu mineral tanelerinin aralarındaki özgül ağırlık farklılığına dayanılarak, ağır bir akışkan ortam içerisinde yüzme ve batma yoluyla birbirinden ayrılması ile yapılan zenginleştirme işlemine "ağır ortam ayırması ile zenginleştirme" veya "Yüzdürme-Batırma İle Zenginleştirme" denilmektedir. Ağır ortam ayırması, belirli yoğunluktaki ağır sıvı içeren bir banyoya beslenen mineral tanelerinden özgül ağırlığı akışkan ortam özgül ağırlığından büyük olanların batması, küçük olanların ise yüzmesi prensibine dayanmaktadır. Kesiksiz bir ağır ortam zenginleştirmesi işlemi genel akım şeması Şekil 12'de özetlenmiştir. Ağır ortam ayırmasında başlıca üç çeşit ağır ortam kullanılmaktadır. Bu ortamlar: Organik sıvılar; Tuzların sulu çözeltileri; Mineral katıların sulu süspansiyonları.



Şekil 12. Ağır ortam zenginleştirmesi akış şeması.

Bir cevherdeki farklı yoğunluktaki minerallerin düşey hareketli bir akışkan ortamda tabakalar halinde ayrılması yoluyla yapılan mineral ayırımına ya da cevher zenginleştirme işlemine jig ile zenginleştirme denir. Diğer bir tanım ise “taban elekli bir kasada, periyodik olarak düşey hareket eden akışkan bir ortam içinde, malzemelerin yoğunluklarına göre tabakalaşmaları” olarak ifade edilmektedir. Zenginleştirme işleminin yapıldığı aygıtta da jig denir. Jigde kullanılan akışkan ortam çoğunlukla su, bazen hava, çok nadir olarak da ağır bir sıvıdır. Jigler, daha çok iri boylardaki cevherlerin (ağır cevher -25 +1 mm, kömür -120 +3 mm), özellikle kömürlerin yıkanmasında kullanılan aygıtlardır. Jigler teknolojik olarak geliştirilerek daha ince tane boylu cevherlerin de zenginleştirilmesinde kullanılmaya başlamıştır. Jiglerin temel yapısı Şekil 13’de verilmektedir. Jigler özgül ağırlıkları farklı minerallerin, ortamın veya jig eleğinin hareketi ile sağlanan titreşim hareketleri vasıtasıyla, ağırlığı yüksek minerallerin alt tabakada, hafif minerallerin ise üst tabakada olmak üzere tabakalaşma yoluyla ayrılma gerçekleşmektedir. Bu şekilde oluşturulan tabakaların ayrı yollarda alınması sonucu zenginleştirme gerçekleştirilir.

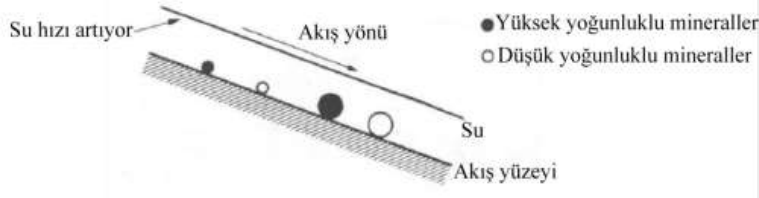


Şekil 13. Bir jig'in yapısal unsurları ve çalışma prensibi.

Küçük boyutlu mineral tanelerinin yataya yakın eğimdeki bir yüzey üzerinde ince bir tabaka halinde akan akışkan ortam içinde özgül ağırlık farklarına göre ayrılmaları yoluyla yapılan işleme tabaka halinde akan akışkan ortamda zenginleştirme denir. Ayırma yüzeyi sabit (Humphrey spiralleri) ve hareketli (Sarsıntılı Masa) olmak üzere iki türü vardır.

Sarsıntılı masalar, yoğunluk farkı ile zenginleştirmenin günümüzde en çok kullanılan makineleridir. Sarsıntılı masa, temel olarak, üzerinde tabaka halinde akışkan akışı olan, kabaca dikdörtgen şekilli ve hareketli bir masa yüzeyidir. Yatayla birkaç derecelik açı yapacak şekilde eğimli olan masa yüzeyi, uygun bir hareket mekanizmasıyla, masanın uzun eksenini doğrultusunda ve geriye doğru olan hareketi daha hızlı olmak üzere, ileri-geri hareket ettirilir. Masa yüzeyi genellikle dar ve uzun eşiklerle kaplanmıştır. Sarsıntılı masa yüzeyinde bulunan mineral taneleri, tabaka halinde akan akışkan hareketi ile akış yönüne dik olan asimetric hareketin bileşke etkisi altında hareket ederler. Şekil 14’de gösterildiği gibi, tabaka içinde en hızlı hareket eden en hafif-en iri tane masa hareketi doğrultusunda en kısa yolu alır. Akışkan tabaka içinde en yavaş hareket eden en ağır-en ince tane ise masa hareketi doğrultusunda en uzun yolu alır. Yuvarlanma hareketinin etkisi de göz önüne alındığında, farklı yoğunluklardaki ve farklı tane boylarındaki

tanelerin akan su tabakası içinde akış doğrultusundaki dizilişleri Şekil 15’dekine benzer şekilde olacaktır. Yuvarlanma hareketi, en çok, iri taneler üzerinde etkili olduğundan en iri ve en hafif tane en hızlı; en küçük ve en ağır tane ise en yavaş harekete sahip olur.



Şekil 14. Sarsıntılı masada farklı yoğunluk ve büyüklükteki tanelerin akan su tabakası içindeki dizilişleri.



Şekil 15. Farklı yoğunluk ve boydaki tanelerin masa hareketi doğrultusundaki dizilimi.

Manyetik Ayırma ile Zenginleştirme: Manyetik ayırma endüstride geniş bir uygulama alanı olan, aslında minerallerin farklı Manyetik özelliklerinden yararlanılarak yapılan bir zenginleştirme yöntemidir. Manyetik ayırma işleminde sürtünme ve gravite kuvvetlerinin mıknatısların çekim kuvvetleri ile birleşmesi suretiyle bir manyetik alan içindeki farklı manyetik özellikteki minerallerin birbirinden ayrılabilmesi sağlanmaktadır. Manyetik ayırma daha çok manyetik olmayan minerallerden manyetik özelliğe sahip değerli minerallerin kazanılmasında, kasiterit’in, şelit’in, sahil kumlarının kazanılmasında, ağır ortam devrelerinde manyetitin kazanılmasında seramik hammaddelerinden demirin arındırılmasında kullanılmaktadır. Manyetik ayırmada manyetik kuvvetlerin ve manyetik alanın özellik farklılıkları etkin olduğundan cevherin bu özellikleri dikkate alınmalıdır. Cevherdeki manyetik kuvvetler: Diamanyetizm (zayıf mıknatıslık); Paramanyetizm (kuvvetli mıknatıslık); Ferromanyetizm (çok kuvvetli mıknatıslık) olarak sınıflandırılmaktadır.

Diamanyetizm: Manyetik duyarlılıkları, yani mıknatıslık özelliği düşük olan bu cisimler manyetik alan içinde itilirler. Diamanyetik maddeler manyetik olarak zenginleştirilemezler.

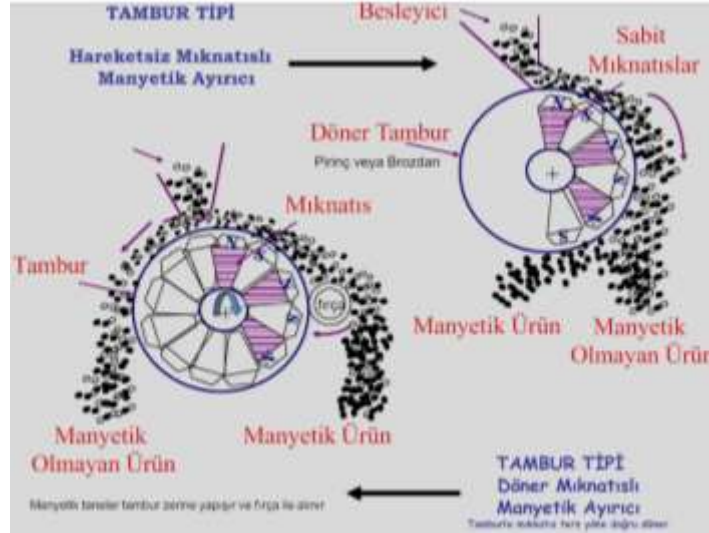
Paramanyetizm: Manyetik duyarlılıkları yüksek olan bu cisimler manyetik alan içinde çekilirler. Paramanyetik mineraller yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılarla ayrılmaktadır. Bu özellikteki minerallere örnek olarak ilmenit, rutil, wolframit, monazit, siderit, kromit, hematit, manganey sayılabilir.

Ferromanyetizm: Ferromanyetik cisimler manyetik duyarlılıkları çok yüksek olan doğal mıknatıslardır. Bu özellikteki mineraller zayıf alan şiddetli ayırıcılarla zenginleştirilirler.

Manyetik alan içinde hareket etmekte olan mineral tanesi manyetik kuvvet dışında yerçekimi, moment, sürtünme, hidrolik ve taneler arası itici-çekici kuvvetlerin etkisi altında kalmaktadır. Cevher zenginleştirmede kullanılan manyetik ayırıcıların ayrıntılı sınıflandırması Şekil 16'da verilmiştir. Tambur tipi sabit mıknatıslı ve döner mıknatıslı düşük alan şiddetli manyetik ayırıcıların şematik gösterimi Şekil 17'de verilmiştir.



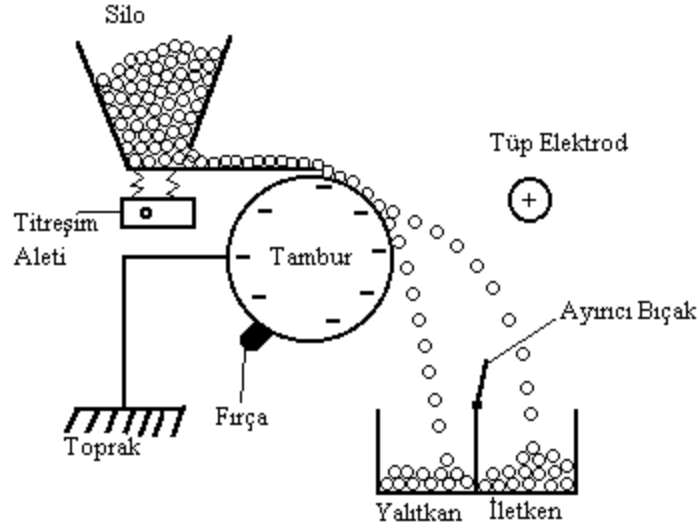
Şekil 16. Manyetik ayırıcıların sınıflandırılması.



Şekil 17. Tambur tipi sabit mıknatıslı ve döner mıknatıslı düşük alan şiddetli manyetik ayırıcıların şematik gösterimi.

Elektrostatik Ayırma ile Zenginleştirme: Elektrostatik ayırıcılar minerallerin elektriksel iletkenliklerinin farkına dayanarak yüksek gerilim altında çalışan cihazlardır. İletkenliği yüksek bir mineral taneciği, topraklanmış bir metal silindir üzerinden düşerken yüksek potansiyelle (10 - 20 000 volt) yüklenmiş bir elektrotun etkisi ile polarize olur ve eğer topraklanmış metal silindire elektron yükünü iletebilirse silindirden ayrılır ve çekici elektrotun etkisi ile silindirden uzaklaşarak düşer. İletkenliği zayıf bir mineral taneciği ise, üzerindeki yükü çok yavaş bıraktığından, silindire

yapışarak birlikte döner ve elektrotun etkisinden kurtulduktan sonra bir fırça ile ayrı bir yerde toplanır. Bir elektrostatik ayırıcının şematik görüntüsü Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18. Elektrostatik ayırıcı.

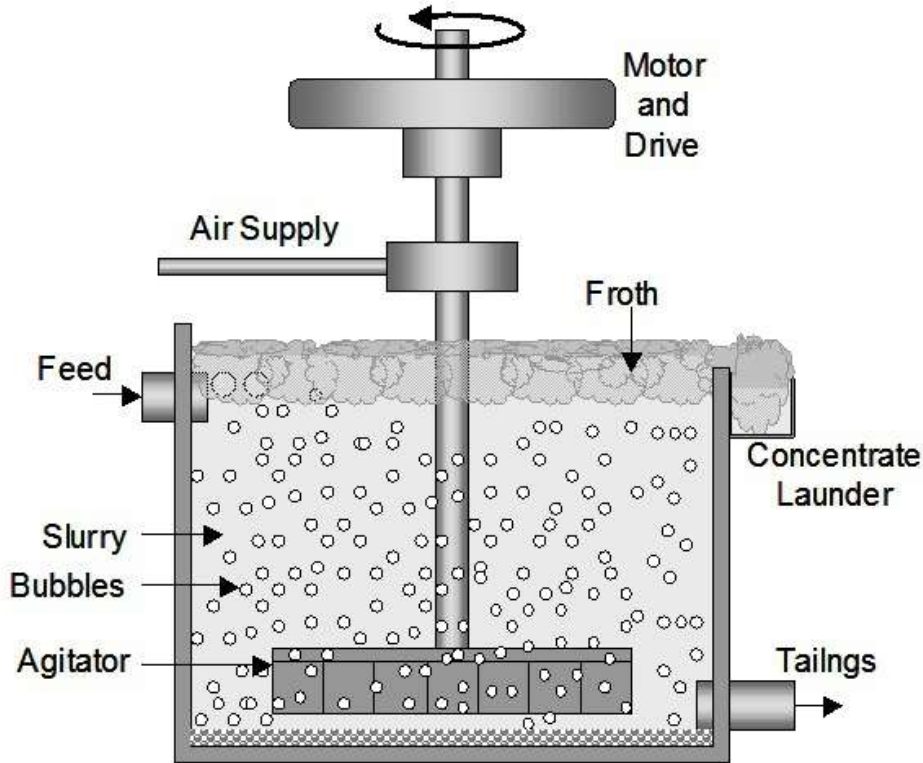
Yüzeysel Özelliklere göre Zenginleştirme: Fakir ve kompleks cevherlerde kıymetli mineraller gang içerisine çok ince olarak dağılmış durumdadır. Gerek kıymetli minerallerin gangdan ayrılarak serbestleşmesi gerekse kıymetli minerallerin birbirinden ayrılması 0,2 mm’den 0,005 mm boyutlarına kadar inen öğütme işletme gerekli kılmaktadır. Bu tane boyutlarında ise anlatılmış olan cevher hazırlama yöntemleri başarılı olamamakta, maddenin özellikleri artık sadece çok büyümüş olan yüzeyler tarafından belirlenmektedir.

Flotasyon, mineral taneciklerinin kırılma yüzeylerinin fiziko-kimyasal yapılarının değişik oluşundan faydalanarak, bunların bir kısmının tercihan hava habbeciklerine yapışarak köpük şeklinde ayrılmasını sağlayan yöntemdir. Bazı minerallerin yüzey yapıları kolayca flotasyonla ayrılmaya müsaittir (kömür, grafit, elmas, kükürt ve molibdenit gibi). Bu mineraller bir miktar hidrokarbon yağı ve köpürtücü içeren ilavelerle kolayca köpüğe ayrılırlar. Kısaca, bu minerallerin yüzeylerindeki atomlar su moleküllerine (veya onun içerisindeki hidroksil veya hidrojen iyonlarına) tepki göstererek ince bir hidrokarbon tabakası ile kaplanırlar ve böylece hava habbeciklerine yapışarak çözelti üzerine köpükle birlikte çıkarlar. Bu taneciklerin yüzeyleri hidrofobdur (suyu sevmez). Su tarafından itilir; hidrokarbon yağlar ve hava tarafından çekilir. Yüzeydeki atomlar arasındaki bağlar kovalent yapıdadır. Diğer minerallerin ise yüzeyleri az veya çok iyonlarla kaplıdır. Bu bağlar genellikle iyoniktir. Su moleküllerine ve içerisindeki iyonlara karşı özel bir çekicilik gösterirler (hidrofil). Cevher karışımını oluşturan minerallerden köpükle ayrılması arzu edilen mineral taneciklerinin yüzeylerine özel reaktiflerin adsorbe ettirilmeleri sayesinde bu minerallerin hava habbeciklerine yapışması sağlanabilir.

Flotasyon çok ince öğütülmüş, gravimetrik yollarla zenginleştirilmesi mümkün olmayan cevherlerin fizikokimyasal, kurallara dayanılarak, köpükle cevher yüzdürme işleminin yapıldığı bir zenginleştirme yöntemidir. Sözlük anlamı “yüzdürmek” olan Flotasyon, bugün madencilik dışında kimya ve kağıt endüstrisinde de kullanılmaktadır, bilindiği gibi cevher hazırlamada büyük ölçüde diğer yöntemlerin yerini almıştır. Flotasyon yöntemi, özellikle bakır, kurşun, çinko cevherlerinde tamamen, kömür, demir, zenginleştirme işlemi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca barit, florit, feldspat, fosfat gibi endüstriyel minerallerin zenginleştirilmesinde de uygulanmaktadır.

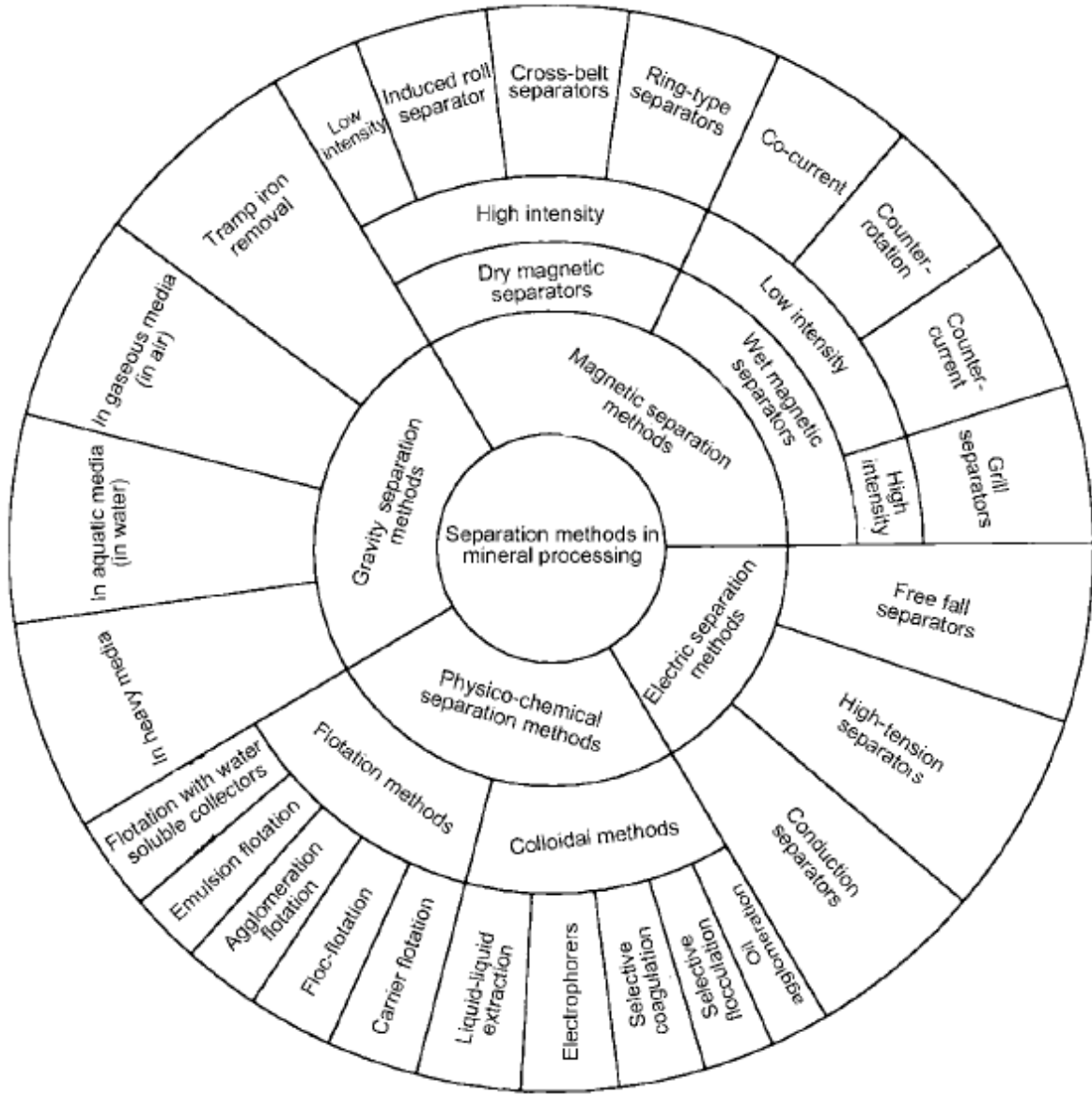
Bilindiği gibi flotasyon işleminde mineral tanelerinin fizikokimyasal yüzey özellik farklılığından yararlanılmaktadır. Reaktif ilavesinden sonra, mineraller arasındaki yüzey özelliklerinin farklılığı flotasyonun esasını oluşturur. Flotasyonun oluşabilmesi için hava kabarcığının minerale bağlanması ve su yüzeyine çıkması gerekmektedir. Genelde, flotasyon ince taneli cevherlere uygulanmaktadır. Eğer cevher çok iri taneli olursa, mineral tanesi ve hava kabarcığı arasındaki adezyon kuvveti mineralin ağırlığından az olacağından kabarcık mineral tanesini tutamayacak ve böylece tane aşağıya düşecektir. Mineralin hidrofob özellikte olması sayesinde, hava kabarcıkları mineralin yüzeyindeki su ile yer değiştirerek hava kabarcığının mineral tanesine yapışması sağlanmakta ve ayrıca hava kabarcığının mineral tanesini, yüzeye ulaştığında da tutması gerekmektedir. Aksi takdirde köpük patlayıp mineral taneleri aşağıya düşecektir. Yukarıda belirtilen bu şartların sağlanabilmesi için bir takım flotasyon prensipleri kullanılmaktadır. İlave edilen flotasyon reaktiflerine göre mineral yüzeyinin aktivasyonu, aynı yüzeye tesir eden kuvvetlere bağlıdır. Minerallerin çoğu doğal yüzme kabiliyetine sahip değildir. Yüzdürme işlemi sırasında, kıymetli minerallerin köpükle beraber konsantre olarak alınışında esas rolü, belirli bir sıra halinde ilave edilen kimyasal reaktifler üstlenmektedir ki bunlara flotasyon reaktifleri denir.

Minerallerin çoğu doğal olarak yüzme yeteneğine sahip değildir. Yüzdürme işlemi sırasında, kıymetli minerallerin köpükle beraber konsantre halinde alınışında esas rolü, belirli bir sıra halinde ilave edilen kimyasal reaktifler üstlenmektedir. Kullanılan reaktifleri şu şekilde sınıflandırmak mümkündür: Kontrol reaktifleri (pH ayarlayıcılar, Bastırıcılar, Canlandırıcılar); Toplayıcı reaktifler; Köpürtücüler. Bir flotasyon hücresinin şematik görüntüsü Şekil 19'da verilmiştir.



Şekil 19. Flotasyon hücresinin şematik görüntüsü.

Cevher hazırlama ve zenginleştirme aşamalarında kullanılan yöntemlerin sınıflandırılması Şekil 20’de verilmiştir.



Şekil 20. Mineral işleme yöntemlerinin sınıflandırılması.

Malzeme Karıştırma

Karıştırma bir maddenin parçacıklarını bir veya birden fazla maddenin parçacıkları arasına yerleştirmektir. Karıştırmaya katılan maddelerin parça büyüklükleri karışımın şeklini ve belli bir hacim içindeki maddelerin parçalarının sayısı karışımın gerçekleşme oranını belirler. Karışımın gerçekleşme oranının büyümesi homojen bir karışıma gidildiğini gösterir. Metalürjik işlemlerde karıştırılacak malzemeler belli bir homojenlik elde etmek ve kimyasal reaksiyonların oluşumun başlatmak açısından önemlidir. Karıştırılacak maddeler katı, sıvı, gaz ve bunların her türlü kombinasyonu şeklinde teknolojik uygulamalarda görülmektedir.

Gazların birbirleriyle karıştırılması kolay olduğundan çoğu kez yapılan iş turbulent bir akış sağlamaktan ibarettir. Brülör tipi bir cihaz en çok kullanılan olup, dar bir boğazdan hızla çıkan bir gazın etrafında mevcut maddenin parçalarını yırtarak içine çekmesi esasına dayanır. Sıvı-gaz karıştırılması sıvının gaz içine püskürtülmesi yoluyla yapılabildiği gibi (mazot brülörü) metalürjideki asıl önemli uygulaması tüyerler vasıtasıyla gazın basınç altında sıvı içerisinde üflenmesi esasına dayanır. Katı-gaz karışımları metalürjik işlemlerde önemli bir yer kaplar. En çok kullanılan yöntem brülörlerin kullanılması esasına dayanır. Bunun yanı sıra akışkan yatak sistemlerinde, katı maddeler içerisine gönderilen gaz miktarı çok dikkatlice ayarlanarak karışım gaz karakterini kaybederek sıvı özellik göstermeye başlar.

Sıvı-gaz karışımlarının çok gaz – az sıvı şeklinde en yaygın uygulaması kolonlar ve yıkama kulelerinde görülmektedir. Çok sıvı – az gaz karıştırılmasında ise mekanik karıştırıcılar ihtiva eden cihazlardan faydalanılır. İki sıvı fazın karıştırılmasında türbülans bir akış sağlanması gerekir.

Katı-gaz karışımlarında katı parçacıkların boyutlarının büyük olması durumunda mekanik karıştırıcılarda yapılır. Amaç katı parçanın yüzeyi ile gazın mümkün olan en fazla temasının sağlanmasıdır. Katı-sıvı karıştırma hem hazırlık hem de temel işlemler açısından önemlidir. Çözündürme işlemlerinin gerçekleştirilmesi iyi bir karışmanın olmasını şart koşar. Çözünülecek maddenin yüzeyinin mümkün olduğu kadar büyütülmesi, maddenin tüm yüzeyinin sıvı ile temasının sağlanması, diğer yandan katı madde yüzeyindeki doymuş çözeltinin yüzeyden ayrılması gibi faktörler çok iyi bir karıştırmanın yapılmasını gerektirir. Katı-sıvı karıştırma cihazları temel yapı olarak bir kap ve çoğunlukla mekanik karıştırıcıdan ibarettir. Katı maddelerin karıştırılması; sabit bir kap içerisinde dönen karıştırıcılarda, hareketli bir kap içerisinde sabit karıştırıcılarda veya bunların kombinasyonlarının kullanıldığı ünitelerde yapılmaktadır. Yapılan iş homojenleştirmedir.

Yüzey Küçültme

Pek çok hammaddenin metalürjik işlemlere girebilmesi için katı halde ve belli boyut sınırları içerisinde olması istenmektedir (yüksek fırın ve şaft tipi fırınlarda toz malzeme beslenmesi istenmez). Bu nedenden dolayı cevher hazırlama işlemleri sonucunda kırılmış veya öğütülmüş malzemelerden alınan ürünün boyutlarının büyütülmesi (yüzeyinin küçültülmesi) gerekmektedir. Aynı şekilde metalürjik süreçlerde toz halinde elde edilen ara ürünlerin veya üretilen toz halindeki metallerin değerlendirilmesi yüzey küçültme işlemlerini gerektirir.

Küçük parçacıkların biriketlenmesi moleküler aktif adezyon ve kohezyon kuvvetlerinin etkisiyle bağlayıcılar ilavesi veya herhangi bir bağlayıcı kullanılmadan yapılmaktadır. Yüzey küçültme belli basınçlar altında sabit devamlı şekillerin oluşumunu sağlamaktadır. Metalürjik hammadde ve yardımcı maddelere uygulanan briketlemede bağlayıcı ilave maddeler kullanılmaktadır. İnorganik veya organik bağlayıcılar katı veya sıvı halde ilave edilebilir. Toz demir cevherlerinin % 5-10 söndürülmüş kireç ilavesiyle yüksek basınçlar altında şekillendirilmesiyle yüksek fırına doğrudan şarj edilebilecek kadar dayanıklı briketler üretilebilir.

İnce parçacıkların öncelikle yüzeylerinin bir sıvı ile kaplanması, konglomeralar halinde bir araya gelip topaklanmaları esasına dayanan peletleme işlemi metalürjide geniş kullanım alanı bulmaktadır. Kullanılan cihazlar peletleme tamburu olarak tanınmaktadır. En yaygın olanında tamburun silindir boyu çapına nazaran çok küçüktür ve tambur dikey değil hafif yatay çalışmaktadır. Üretilen briket ve peletlerin yeterli sertliğe sahip olmamaları halinde bir pişirme işlemine tabi tutulmaları gerekmektedir.

Sinterleme işlemi ile demir cevherine iyi özellikler kazandırılmakta doğrudan kullanılmayan demir cevheri tozlarının, tufal ve baca tozu gibi atık duruma gelmiş diğer demirli maddelerin, günümüzün sıvı ham demir üretim prosesi olan yüksek fırınlarda kullanılabilmesi sağlanmaktadır. Sinterlemede, yüksek fırın üretim teknolojisinde toz boyut sayıları demir cevherinden ve çoğu demir oksit diğer demirli maddelerden oluşan sinter harmanı, harmanda bulunan kok tozunun yanması sonucu çıkan ısı ile kısmi olarak ergiyerek bloklar hâline gelir (Aglomere olur.). Yanma sonunda partiküllerin yüzeyleri ergime sıcaklığına ulaşır ve gang bileşenleri yarı sıvı bir cüruf oluşturur. Bu sırada sinterleme prosesinin reaksiyonları da gerçekleşir. Harmanda bulunan kottaki karbonun yanmasının dışında bu reaksiyonlar; harmanda bulunan nemin buharlaşması, karbonatların parçalanması, sülfürlü bileşiklerin oksitlenerek kükürdünün yanması ve sistemden uzaklaştırılması, alt oksitli demirli minerallerin oksitlenmesi vb. şeklinde sıralanabilir.