

MİNERALDEN METALE BAKIRIN YOLCULUĞU

Doç. Dr. Nuray KARAPINAR [Maden Mühendisi, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü

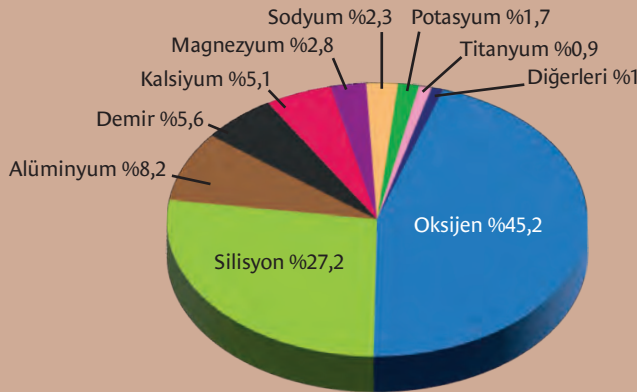


Doğada bulunan 92 elementten 72 tanesi metaldir. Metaller kimyasal elementler olup mükemmel ısı ve elektriksel iletkenlikleri, yüksek mekanik dayanıklılık ve çekme yatkınlığı özellikleri ile diğer malzemelerden ayrılır. İşte bu özellikleri dolayısıyla metaller geçmişten günümüze mühendislik uygulamalarının vazgeçilmez malzemesi olmuştur. İnsanlığın metal ile tanışması doğada nabit halde bulunan metallerin kullanımı ile tarih öncesi çağlara (MÖ yaklaşık 8.000 yıl öncesine) uzanır. Metaller saf hâllerinde işlenebileceği gibi diğer metal ve ametaller ile alaşım hâlinde de kullanılabilir.

Metaller de dâhil tüm doğal elementler yer kabuğunu oluşturan kayalar içerisinde dağılmış durumdadır. Ancak bazı elementler daha yoğun bir şekilde bulunurken bazıları daha az bulunur. Yer kabuğunda bulunan 92 elementin her birinin miktarı ağırlıkça birkaç ppm'den yüzde mertebesine kadar değişir. Bir elementin veya metalin yer kabuğunda bol bulunduğunu söylemek için o metalin ağırlıkça oranının %0,1'in üzerinde olması gerekir. Aslında yalnızca dokuz element (oksijen, silisyum, alüminyum, demir, kalsiyum,

sodyum, potasyum, titanyum ve magnezyum) yer kabuğunun %99'unu oluşturur. Geriye kalan elementler ise yer kabuğunun ağırlıkça ancak %1'ni oluşturur. Dolayısıyla metallerin çoğunun yer kabuğundaki miktarları %1'den azdır.

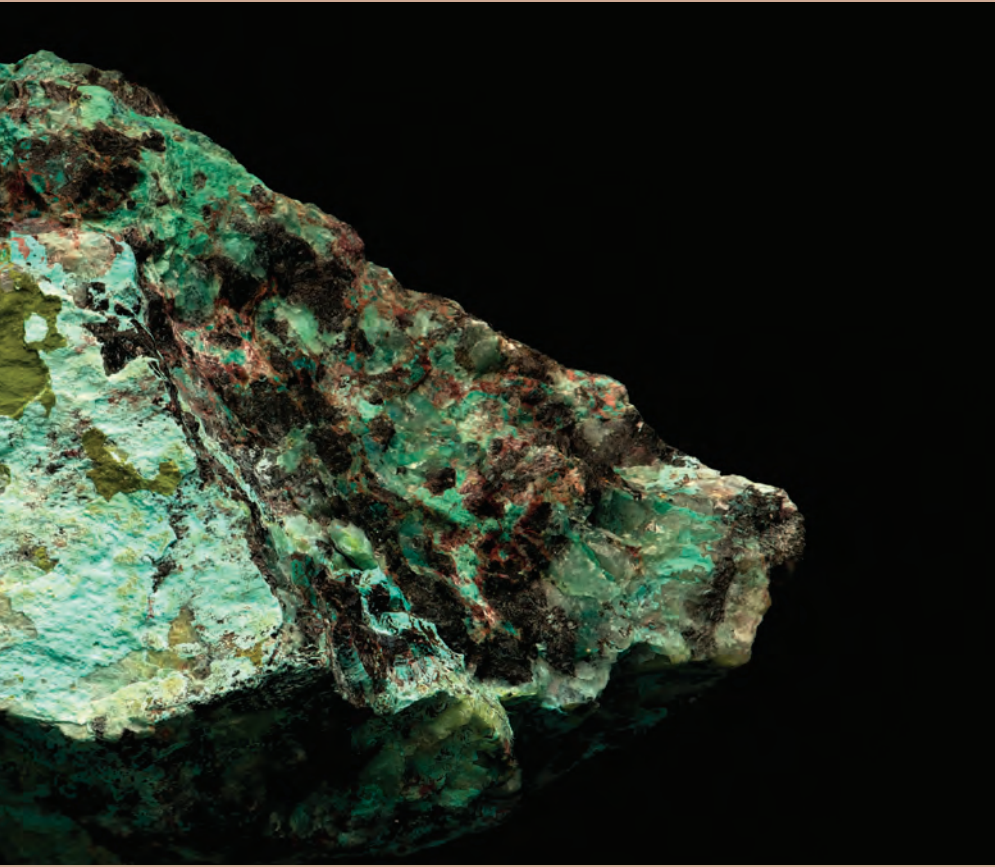
Kıtasal kabuğun bileşimi



Jeokimyasal olarak kıt bulunan bazı elementler

Bakır
Nikel
Kobalt
Kurşun
Çinko
Krom
Kalay
Cıva
Altın
Gümüş
Platin
NTE (Nadir Toprak Elementleri)





Metal olsun olmasın, elementler yer kabuğunun içeriğinde yaygın olarak mineral hâlde bulunur. Mineraller doğal olarak oluşan homojen, katı, kristal halde, kimyasal element veya bileşiklerdir. Doğada bulunan elementlerin çeşitli kombinasyonları ile oluşan yaklaşık 4.500 mineral vardır. Mineraller temelde doğal elementler, sülfürler, oksitler, hidroksitler, karbonatlar, sülfatlar, fosfatlar, boratlar, halitler ve silikatlar olarak gruplandırılır. Bakır, altın ve gümüş gibi bazı metaller doğada bileşik oluşturmadan element hâlinde bulunabilir. Bu metaller nabit metal olarak da adlandırılır. Altın dışındaki diğer metaller nadir olarak element hâlinde bulunur. Ayrıca metal sınıfında yer almayan bazı elementler de doğada saf hâlde bulunabilir. Örneğin elmas

ve grafit karbon elementinin doğal saf hâlidir. Ayrıca sülfür de doğada element olarak bulunabilir. Doğada kıt bulunan elementlerin mineral oluşturması bazı jeolojik süreçlerle elementin yerel düzeyde zenginleşmesine bağlıdır. Bu durum, yer kabuğunu meydana getiren kayaçların genel oluşumu sürecinde nadiren gerçekleşir. Bu nadir olay jeokimyasal anomoli diye adlandırılır. Yer kabuğunda dağılmış olan metallerin olağan dışı bir konsantrasyonda bulunduğu bu jeokimyasal anomaliler, kullandığımız metallerin ve birçok endüstriyel mineralin kaynağı olan mineral yataklarını oluşturur. Metallerin elde edildiği mineralleri içeren mineral yatakları, maden yatağı veya cevheri olarak tanımlanır; bakır madeni, bakır

cevheri gibi. Metallerin elde edildiği bu cevherleri oluşturan minerallere de cevher mineralleri denir. Cevher mineralleri dışında bazı minerallerin fazla işlenmesine gerek duyulmaz. Endüstriyel mineraller denilen bu mineraller, kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı maden ocağından çıkarıldıkları hâllerine endüstriyel bir süreçte doğrudan kullanılabilir. Endüstriyel mineraller; kum, çakıl, granit, kireç taşı gibi inşaat yapı malzemeleri olabileceği gibi; daha değerli olan florit, fosfat, kaolin ve perlit gibi mineraller de olabilir. Bunlarla birlikte, metal elde edilen bazı minerallerin endüstriyel süreçlerde doğrudan kullanımı da söz konusu olabilir. Örneğin, boksit minerali alüminyum metali eldesinde kullanıldığı gibi doğrudan mineral hâliyle de endüstride kullanılabilir.

Metalleri elde etmek için mineral hâlde metal içeren cevherin yer kabuğundan çıkarılması, cevher minerallerinin zenginleştirilmesi ve/veya zenginleşen cevher minerallerinden veya konsantrasyon cevherden bu metallerin saf olarak elde edilmesi gerekir. Madencilik endüstrisi, cevherin bulunduğu yerden çıkarılmasından metalin elde edilmesine kadar gerçekleştirilen tüm bu süreçleri kapsar.

Element ve metallerin yer kabuğunda nasıl bulunduğunu kısaca anlattık. Şimdi de bakır metalinin tarihsel kullanımına, ardından da cevherden metale bakırın yolculuğuna bir göz atalım.

Geçmişten Günümüze Bakır Metalinin Kullanımı

Bakır jeokimyasal olarak kıt bulunan metaller arasında bolluk oranı en fazla olan metaldir (%0,0055). Nadir de olsa nabit (saf) hâlde bulunabilen bakır, altın ile birlikte insanlığın bildiği en eski metallere aittir. Antik çağlardan beri insanlar bakır ve alaşımlarını kolay işlenebilirliği, dayanıklılığı ve nispeten korozyona dayanıklı olması dolayısıyla sayısız alet ve eşya yapımında kullanageldi. Hem bakır hem de bakır ile kalayın karışımı ile elde edilen alaşım olan tunç keşfedilip işlendikleri tarih öncesi çağlara adlarını verdi. Diğer metallerle karıştırılarak endüstriyel açıdan önemli alaşımlar elde edilmesini sağlaması, tarih öncesi çağlardan beri bakır toplumlar için vazgeçilmez bir metal kıldı.

Bakır, bütün metaller içerisinde, gümüşten sonra elektriği en iyi ileten metaldir. Bakırın bu özelliğinin 19. yüzyıl sonunda keşfedilmesiyle kullanımı arttı. Bakır, diğer metaller içerisinde elektriği en az güç kaybıyla iletebilmesinin yanı sıra iletim kablolarının gerek esnek ve yumuşak olmasını

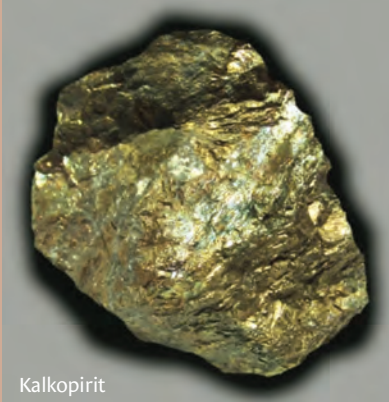


gerekse kolayca birleştirilebilir ve lehimlenebilir olmasını sağladığı için bu alanda vazgeçilmez hâle geldi.

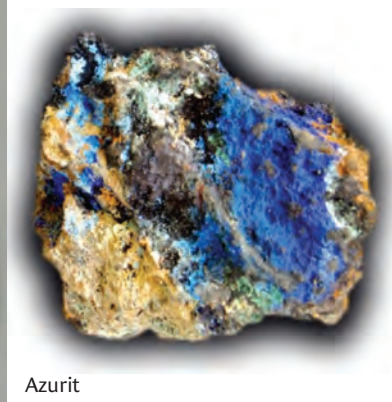
Bakır metalinin aynı zamanda antibakteriyel özelliği olduğunu biliyor muydunuz? Antik çağlardan beri su tesisatlarında bakırın tercih edilmesinin sebebi bu olabilir mi? Eski Mısırlılar MÖ 275 yıllarında su taşımak için bakır

borular kullanmışlar. Romalılar da su deposu uygulamalarında bakır kullanmışlar. Yakın zamanda Avustralya'da bulunan RMIT (Royal Melbourne Institute of Technology University) Üniversitesi ve Avustralya Ulusal Bilim Ofisi (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization-CSIRO) araştırmacıları bakterileri normal bakır yüzeylere göre 100 kat daha

Bazı bakır mineralleri



Kalkopirit



Azurit



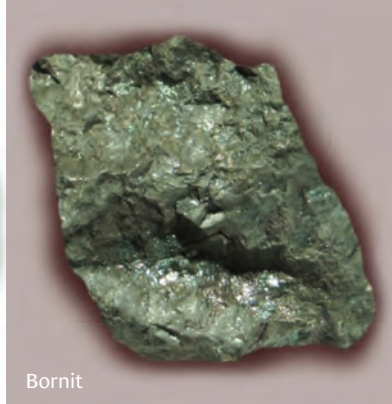
Kuprit



Nabit bakır



Malahit



Bornit

Pandemi ile birlikte bakırın antibakteriyel özelliği dolayısıyla belirli alanlarda kullanımı artar mı tahmin etmek zor ama bakır zaten birçok alanda yaygın olarak kullanılıyor. Günümüzde demir ve alüminyumdan sonra en fazla tüketilen üçüncü metal bakırdır. Elektrik dağıtımı, tesisat, haberleşme, inşaat, elektronik, motor, savunma, otomotiv, havacılık ve uzay ile sağlık alanlarında yaygın olarak bakıra başvuruluyor. Bakırın kullanıldığı ve yaygınlaşması beklenen elektrik motorlarının kullanımının artması ile bakıra olan talebin de giderek artacağı öngörülüyor.

Cevherden Metale Bakırın Yolculuğu

Doğada farklı bileşim ve miktarda bakır içeren birçok mineral bulunur. Bunlar arasında madencilik açısından en önemlileri sülfürlü bakır bileşikleridir olup en önemli cevher minerali de kalkopirittir. Ayrıca, kalkosit, bornit, enarjit ve tetrahedrit de madenciliği yapılan diğer sülfürlü bakır mineralleridir. Sülfürlü minerallerin yanı sıra karbonatlı bakır mineralleri (azurit ve malahit) ile oksitli bakır mineralleri (kuprit ve tenorit) de madenciliği yapılan diğer bakır cevheri mineralleridir.

hızlı öldüren yeni bir bakır yüzeyi geliştirdiler. Araştırmacılar Ma Qian, standart bir bakır yüzeyde bakterilerin %97'sinin 4 saat içerisinde öldüğünü ancak yeni geliştirilen bakır yüzeyde bakterilerin %99,99'unun ölmesinin yalnızca 2 dakika sürdüğünü belirtiyor.

Qian'a göre, herhangi ek bir kimyasal madde kullanılmadan

120 kat daha hızlı bir etkinlik sağlandı. Araştırma ekibi, bu yeni malzemenin antimikrobiyal kapı kolları; hastane, okul, konut ve toplu taşımadaki dokunma yüzeyleri; antimikrobiyal havalandırma sistemleri ve yüz maskeleri gibi oldukça geniş bir uygulama alanı bulabileceğini belirtiyor. Ayrıca, geliştirilen bu yeni bakır yüzeyin SARS-Cov-2'ye karşı da etkinliğinin araştırılacağı vurgulanıyor.

Başlıca Bakır Cevheri Mineralleri

Mineral	Kimyasal formülü	Bakır içeriği (%)
Nabit bakır	Cu	99,9
Kuprit	Cu ₂ O	88,8
Dijenit	Cu ₉ S ₅	85,6
Tenorit	CuO	79,9
Kalkosin	Cu ₂ S	79,9
Bornit	Cu ₅ FeS ₄	63,3
Enarjit	Cu ₃ AsS ₄	59,7
Malahit	Cu ₂ (CO ₃)(OH) ₂	57,5
Azurit	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	55,3
Tetraedrit	Cu ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	34,8
Kalkopirit	CuFeS ₂	34,6

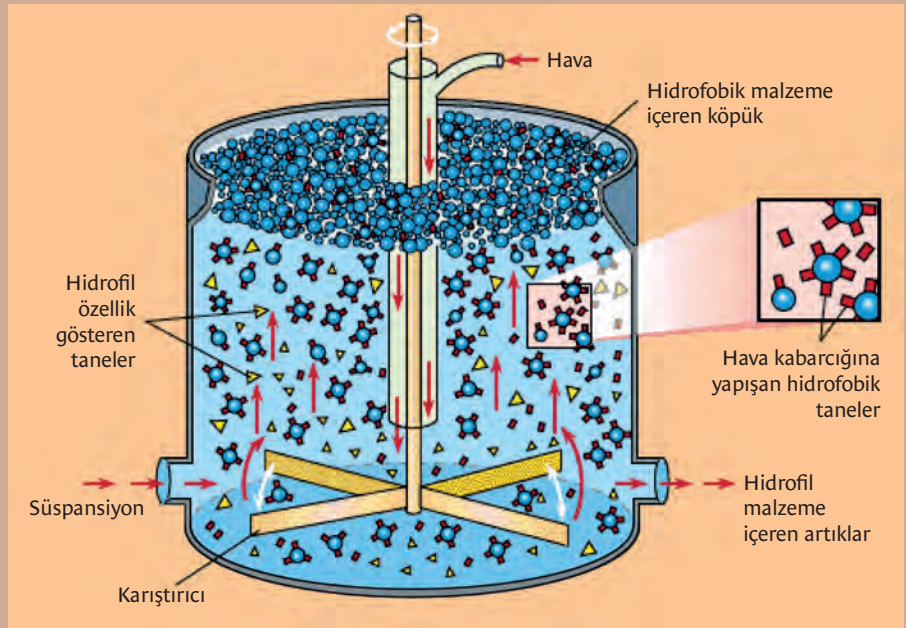
%0,5 Cu ve hatta daha az miktarda bakır içeren maden yatakları; bakır metalinin satış fiyatı, toplam cevher rezervi, uygulanacak madencilik yöntemi ve bakır yatağının jeolojik yapısına bağlı olarak ekonomik olarak işletilebilir.

Bakır metalini elde etmek için bakır içeren cevher minerallerinin bünyesinden bakırın çıkarılıp metalik bakıra dönüştürülmesi gerekir. Ancak bunun için bakır cevheri öncelikle yer kabuğundan çıkarılmalıdır. Cevheri çıkarmak için kullanılan temel üç yöntem vardır: yüzey, yer altı ve yerinde çözelti madenciliği. Hangi yöntemin kullanılacağı maden yatağının jeolojik karakteristikleri ile birlikte güvenlik, teknolojik, çevresel ve ekonomik kısıtlara bağlıdır. Yer kabuğu içinde bulunduğu derinliğine göre bakır cevheri yüzey veya yer altı madencilik yöntemi ile

kazılarak çıkarılır. Bazen yüzey madenciliğinden sonra yer altı madenciliği yöntemi ile cevher çıkarmaya devam edilir. Yüzey madenciliği günümüzde bakır

madenciliğinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Çünkü yüzey madenciliği yer altı madencilik yöntemine göre daha güvenlidir ve maliyeti düşüktür, ayrıca doğası gereği yüksek cevher üretim potansiyeli ve üretimde esneklik sunar. Yer altı maden işletme yöntemi, yer kabuğu içerisinde daha derinlerde bulunan ve metal içeriği açısından daha zengin olan (yüksek tenörlü) cevherlerin çıkarılmasında tercih edilir. Diğer bir madencilik yöntemi olan yerinde çözelti (yerinde liç) madenciliğinde ise cevher kazılıp çıkartılmaz, onun yerine maden yatağından uygun bir çözelti geçirilerek minerallerin yerinde çözündürülmesi gerçekleştirilir. Yüklü çözelti daha sonra metalin

Bir flotasyon hücresinin şematik gösterimi



Süspansiyon içindeki hidrofil (suyu çeken) özellik gösteren farklı minerallerden birinin yüzeyi uygun bir kimyasal ile modifiye edilerek hidroforik (suyu iten) özellik kazandırılabilir. Böylece hava kabarcıklarına yapışarak köpüğe gelmesi ve diğerlerinden ayrılması sağlanabilir.



Vanha Kavious Eski Bakır Madeni
(1910-1989) Madencilik Müzesi
Outokumpu - Finlandiya (2013)

Kıbrıs adasında bakır yataklarına bolca rastlandığından, tüm dillerde bakırın karşılığı olan sözcüklerin “Cyprium” kelimesinden türetildiği tahmin ediliyor. Bakır Latince “cuprum”, İngilizcede “copper”, Almancada “kupfer” ve Fransızca “cuivre”dir. Antik Yunan mitolojisinde Afrodit’in (Venüs) Kıbrıs’ta doğduğuna inanılır. Buradan yola çıkarak simyacılar bakır metalini Venüs’ün aynası denilen simge ile göstermişlerdir. Bakırın simgesi astrolojide Venüs gezegenini; biyolojide ise kadını simgeler.



Bakır madeni açık ocak işletmesi - Kastamonu - Küre (2012)

Küre ilçesinin adının küre-i nühas’tan (Bakır ocağı) geldiği bilinir. Küre, Farsçada “ocak” anlamına gelir. Ancak ilçenin adının Latince ve diğer Batı dillerinde bakırın karşılığı olan kelimelere benzerliği dikkat çekicidir. Özellikle de Fransızca bakır anlamına gelen “cuivre”den kaynaklanması olasılık dâhilinde olabilir.

kazanılması için ayrı bir işleme tabii tutulur. Yüze ve yer altı madenciliğinde ise çıkarılan cevher zenginleştirme tesisine taşınır.

Bir cevher yatağının ekonomik değerlendirilmesi sadece cevherin kalite ve miktarına bağlı değildir, aynı zamanda değerli mineral ve metalin istenmeyen safsızlıklardan ayrılabilmesine de bağlıdır. Çünkü bir cevher maalesef sadece cevher minerallerinden oluşmaz, aynı zamanda gang mineralleri denilen ve madenciliği yapılan metalin elde edilmesi süreçlerinde uzaklaştırılması gereken farklı mineralleri de içerir. Bununla birlikte, bir cevher birden fazla farklı metale ait cevher mineralleri

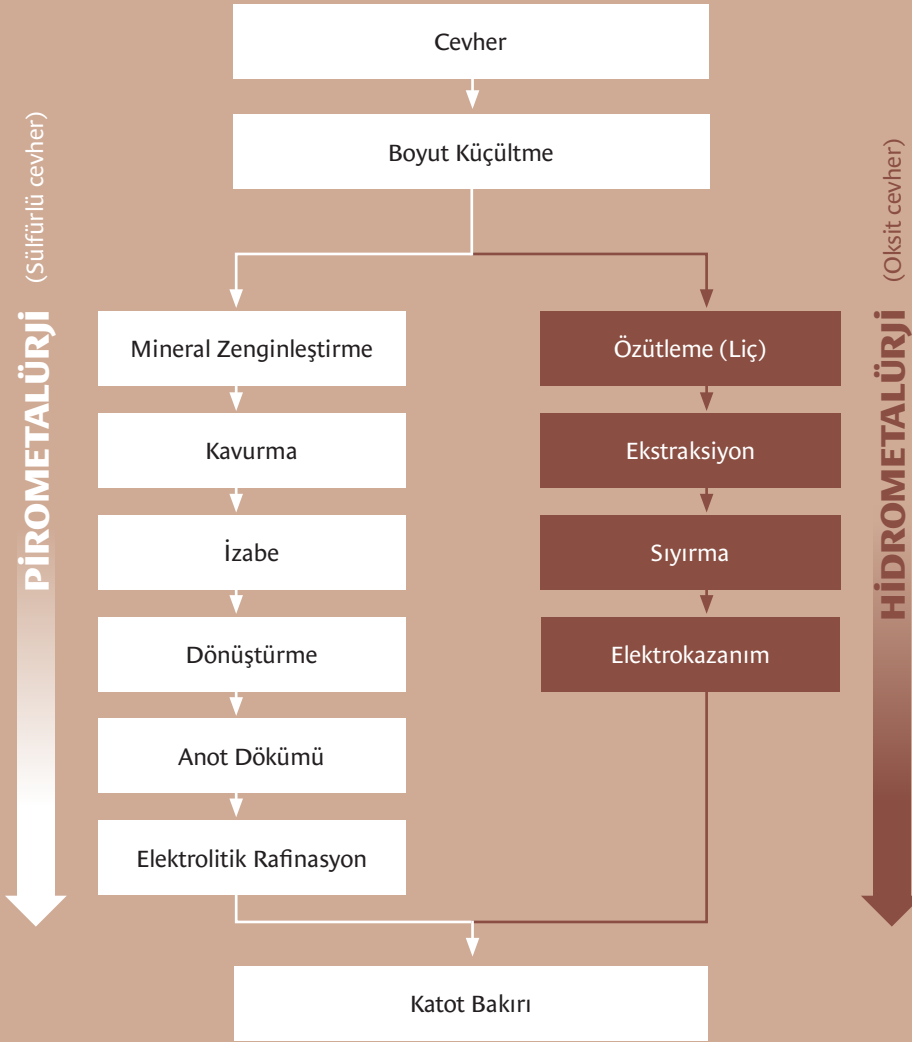
de içerebilir, bir bakır cevherinin içinde bakır minerallerinin yanı sıra kurşun ve çinko mineralleri de bulunabilir. Dolayısıyla istenmeyen gang minerallerinin uzaklaştırılması, farklı cevher

minerallerinin birbirinden ayrılması ve bir sonraki süreç için gerekli metal içeriğinde konsantre hazırlamak için mineral bazda zenginleştirme işlemi gerçekleştirilir.

İçinde ne kadar bakır var?

- Bir uzay mekiği için 4.536 kg bakır kullanılır.
- Bazı nükleer denizaltı türleri için 90.718 kg bakır kullanılır.
- ABD’de tüketilen bakır ürünleri ile Dünya’yı 2.630 kez çevreyebilecek veya Ay’a 26.140 kez gidip gelebilecek uzunlukta bir elektrik teli yapabiliriz.
- ABD’deki ortalama bir evin inşasında 180 kg bakır kullanılır.
- ABD yapımı tipik bir otomobilde 22,68 kg bakır bulunur.
- Bir Boeing 747 uçağının yaklaşık %2’si (4.082 kg) bakırdır.
- ABD’de 1963’ten beri inşa edilen binalarda kullanılan bakır boru tesisatının uzunluğu 8,5 milyar metredir ve bu ölçüde bir boru Dünya’yı 200 kez dolanmaya yetecek uzunlukta.

Bakırın mineralden saf metale giden yolculuğu



Buna mineral zenginleştirme denir. Bu zenginleştirme işleminde mineral bazda bir ayırma söz konusudur, mineraller birbirinden fiziksel ve fizikokimyasal özellikleri arasındaki farklılıklara dayanılarak ayrılır. Manyetik ayırma, gravite ile ayırma, elektrostatik ayırma ve flotasyon (köpüklü yüzdürme) teknikleri mineral bazda gerçekleştirilen zenginleştirme yöntemlerine örnek verilebilir.

Genel olarak %0,4-10 bakır içeren sülfürlü bakır cevherleri flotasyon yöntemi ile zenginleştirilir. Bu yöntem ile ayırma yapılırken cevher ve gang minerallerinin yapay olarak oluşturulan yüzey özellikleri arasındaki farktan yararlanır. Tabii ki cevheri oluşturan farklı minerallerin (ister gang isterse cevher minerali olsun) ayrılabilmesi için öncelikle minerallerin birbirine göre serbestleşmiş olması gerekir. Bu da bir dizi kırma ve öğütme gibi boyut küçülme işlemi ile gerçekleştirilir.



Flotasyon işlemi sırasında, flotasyon hücresi içerisinde hava kabarcıkları oluşturulur. Bazı mineraller (genellikle değerli mineraller) bu hava kabarcıklarına yapışarak hücrenin yüzeyine yükselirken diğerleri (genellikle gang mineralleri) hava kabarcıklarına yapışmaz ve dibine batar. Bu şekilde bakır içeren değerli mineraller, bakır içermeyen gang minerallerinden ayrılır ve bakır mineralince



Diğerinde ise, kimyasal tepkimeler, yüksek sıcaklıklarda (tipik olarak 500-2.000 °C'ta) gazlar ve katılar arasında veya gazlar ve ergimiş malzemeler arasında gerçekleşir. Ekstraktif metalürjinin bu dalına da pirometalürji denir.

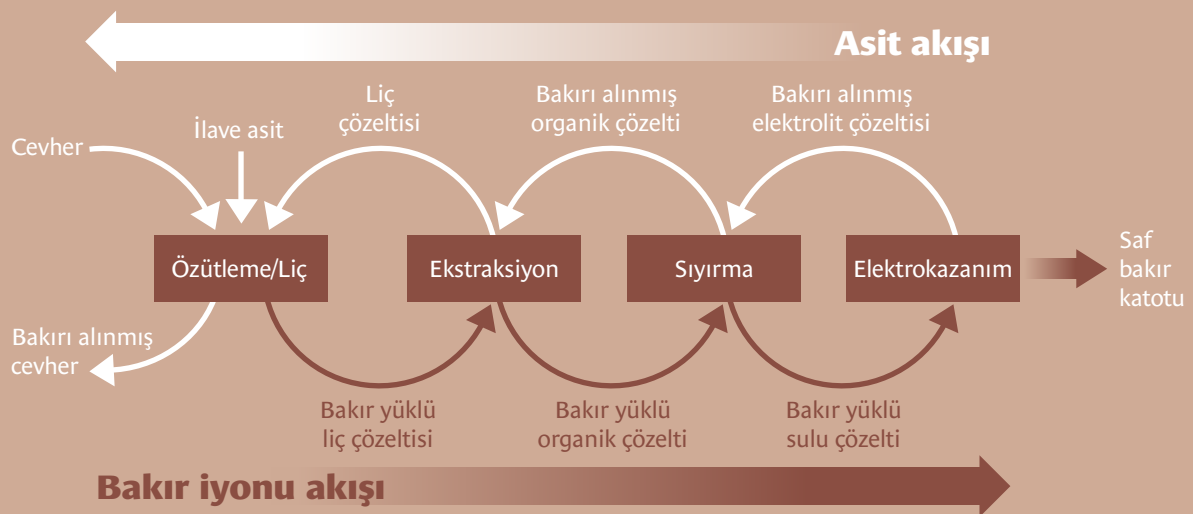
Bakırca zenginleştirilmiş sülfürlü mineral konsantresinden (örneğin kalkoprit-CuFeS₂ konsantresi) bakır metalini elde etmek için pirometalürjik yöntemler uygulanır. Önce cevherin kavrulmasıyla cevherdeki kükürdün bir kısmı yakılır ve sonrasında ergitme işlemi (izabe) uygulanarak malzeme "mat" bakıra dönüştürülür. Bakır matı sıvı alaşım hâlinde ve Cu₂S ile FeS bileşimindedir. Elde edilen bu sıvı hâldeki bakır matı dönüştürücüye gönderilir, yabancı maddelerinden arındırılması sonucu elde edilen beyaz mat (%70-80 Cu₂S)

zenginleşmiş konsantre elde edilir. Flotasyon yöntemi ile %1 bakır içeren bir cevher %30'un üzerinde bakır içeren bir konsantreye dönüştürülebilir. Ancak cevherin metale dönüşümü henüz gerçekleşmemiştir ve yolculuğun devam etmesi gerekir.

Bakır konsantresinden veya cevherden saf metal üretimi ekstraktif metalürji yöntemleri

ile gerçekleştirilir. Bu süreçte kullanılan iki işlem rotası vardır ve uygulanacak yöntem belirlenirken mineralin hangi formda bulunduğuna dikkat edilir. Birinde, nispeten düşük sıcaklıklar ve genellikle sulu çözeltilerde gerçekleştirilen kimyasal tepkimelerle mineral bileşimindeki metalin çözündürülmesi sağlanır. Bu işlem hidrometalürji disiplini.

Düşük metal içereklilikli oksitli bakır cevherinin özütlenmesi ve metal kazanımı (Hidrometalürji rotası)





Bakır cevheri

hava ile oksitlendirilerek %97-98,5 Cu saflıkta bilister bakıra dönüştürülür. %99'un üzerinde bir saflıkta bakır elde edilmek isteniyorsa sürece rafinasyon işlemi ile devam edilmesi gerekir.

Bilister bakırın rafine edilmesi ateşle rafinasyon (fire-refining) ve elektrolitik rafinasyon yöntemleri

ile gerçekleştirilir. Ateşle rafinasyon sonrası %99,2-%99,6 saflıkta bakır elde edilir. Ateşle rafinasyon işlemi ile elde edilen bakır anotları elektrolitik rafinasyon ile %99,99 saflıkta rafine bakır katotlara dönüştürülür.

Mineral zenginleştirme metal eldesinin birinci aşamasıdır.

Ancak bazı cevherler için mineral bazda bir zenginleştirme mümkün/ekonomik olmayabilir. Böyle bir durumda bakırın cevherden metale yolculuğu hidrometalürjik yöntemlerle gerçekleşir. Eğer yerinde çözelti madenciliği uygulanmayacaksa yer kabuğundan kazılarak çıkarılan cevher, boyut küçültme işlemi sonrasında yığın hâlinde arazide veya tank içerisinde uygun çözücüler kullanılarak değerli metalin çözünmesi sağlanır.

Daha sonra bakırın bakır yüklü çözeltilerden ayrıştırılması (solvent ekstraksiyon-SX) ve sonrasında da elektrolitik yöntemle metalik bakıra dönüştürülmesi sağlanır. Elde edilen ürün elektrolitik rafinasyon işleminde olduğu gibi yine rafine bakır katotlarıdır. Dünya genelinde bakır üretiminin yaklaşık %15'i hidrometalürjik yöntemle gerçekleştirilir. Bu yöntem genel olarak düşük tenörlü, oksitli ve hatta bazı sülfürlü bakır cevherlerinden metalik bakır elde edilmesinde kullanılır.

Diğer metallerle karıştırılarak endüstriyel önemi yüksek alaşımlar ortaya çıkarması bakırın tarih öncesi çağlardan beri insanlık için vazgeçilmez kılıştır. Her biri kendine has özelliklere sahip 400'den fazla bakır alaşımı vardır.

