

Porfiri bakır yatakları

Porfiri bakır yatakları (PBY), yüksek tonajlı ve düşük-orta tenörlü (yüzde 0.3–2.0 bakır) büyük hacimli kayaçlar içinde dengeli şekilde dağılmış damar ve breşler içinde saçınımlı haldeki bakır minerallerinden oluşmuştur. Konak kayaçlar büyük ölçüde altere olmuş ve granitoid ve porfiri intrüzyonlar ile kökensel olarak ilişkilidir. PBY, dünyadaki bakır üretiminin %60'dan fazlasını ve bilinen bakır rezervlerinin %65'den fazlasını karşılar. Bu yataklar bakırın yanı sıra, molibden, altın ve gümüş gibi diğer metaller için de önemli bir kaynak teşkil eder. Göreceli düşük tenörlüğüne rağmen, büyük tonajlı olmaları, uzun maden işletme ömrü ve ebatları (yüz milyon-yüz milyar metrik ton arasında) göz önüne alındığında PBY'nin önemli derecede ekonomik ve toplumsal etkileri olduğu aşikârdır. PBY 20. yüzyılın başlarında açık-ocak ve büyük ölçekli madencilik yöntemleriyle keşfedilmiş ilk metalik maden yataklarıdır. Diğer büyük tonajlı, düşük tenörlü maden yataklarına göre (altın ve gümüş gibi) düşük işletme maliyetine sahip olması PBY'nin en büyük avantajıdır.

İlgili emtialar ve yatak tipleri

PBY esas olarak bakır için işletilirler ancak yatakların bazısında molibden ve altın çoğunda ise gümüş yan ürün olarak elde edilir. Renyum, tellür, platin grup elementler, arsenik ve çinko sadece sınırlı sayıda yataktan üretilir. PBY, artan Mo/Cu oranı ile düşük florlu (kuvars monzonit tip) porfiri molibden yataklarına, artan Au/Cu oranı ile porfiri altın yataklarına geçiş gösterirler.

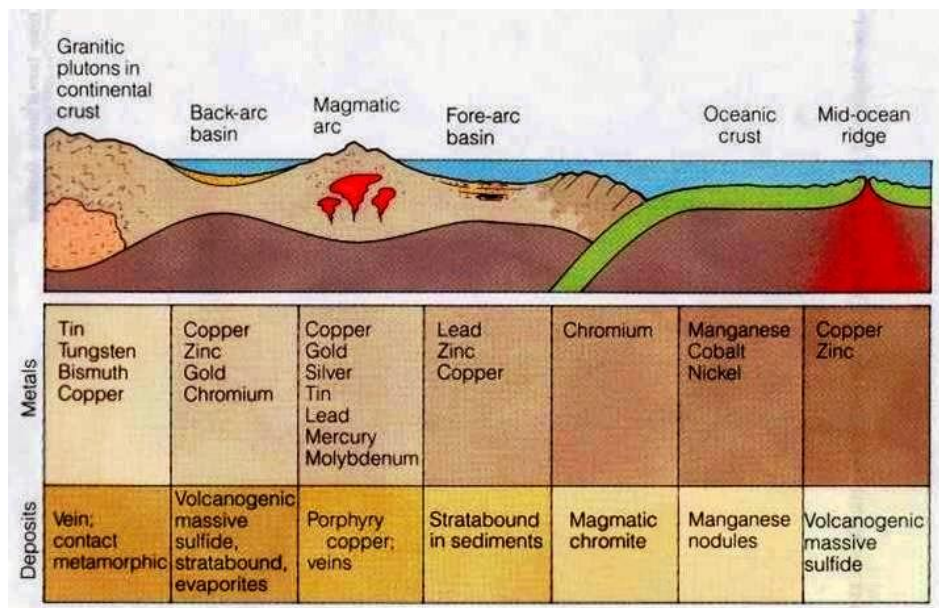
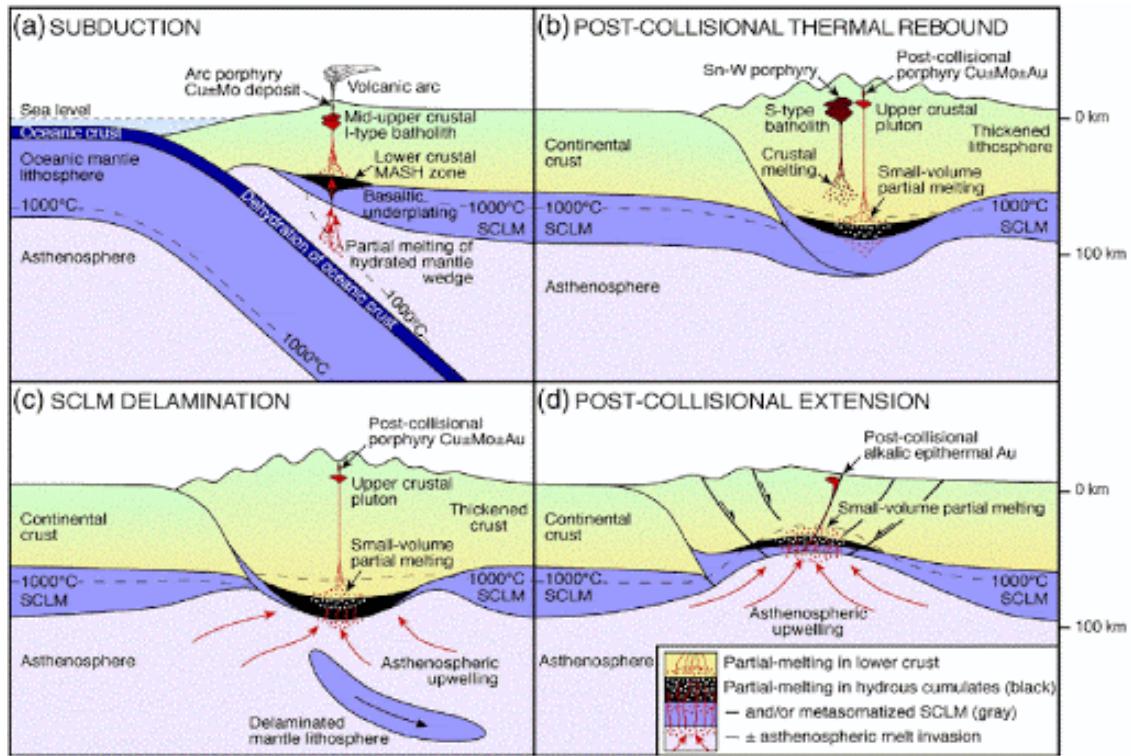
PBY ile kökensel ilişki gösteren çok sayıda maden yatağı vardır:

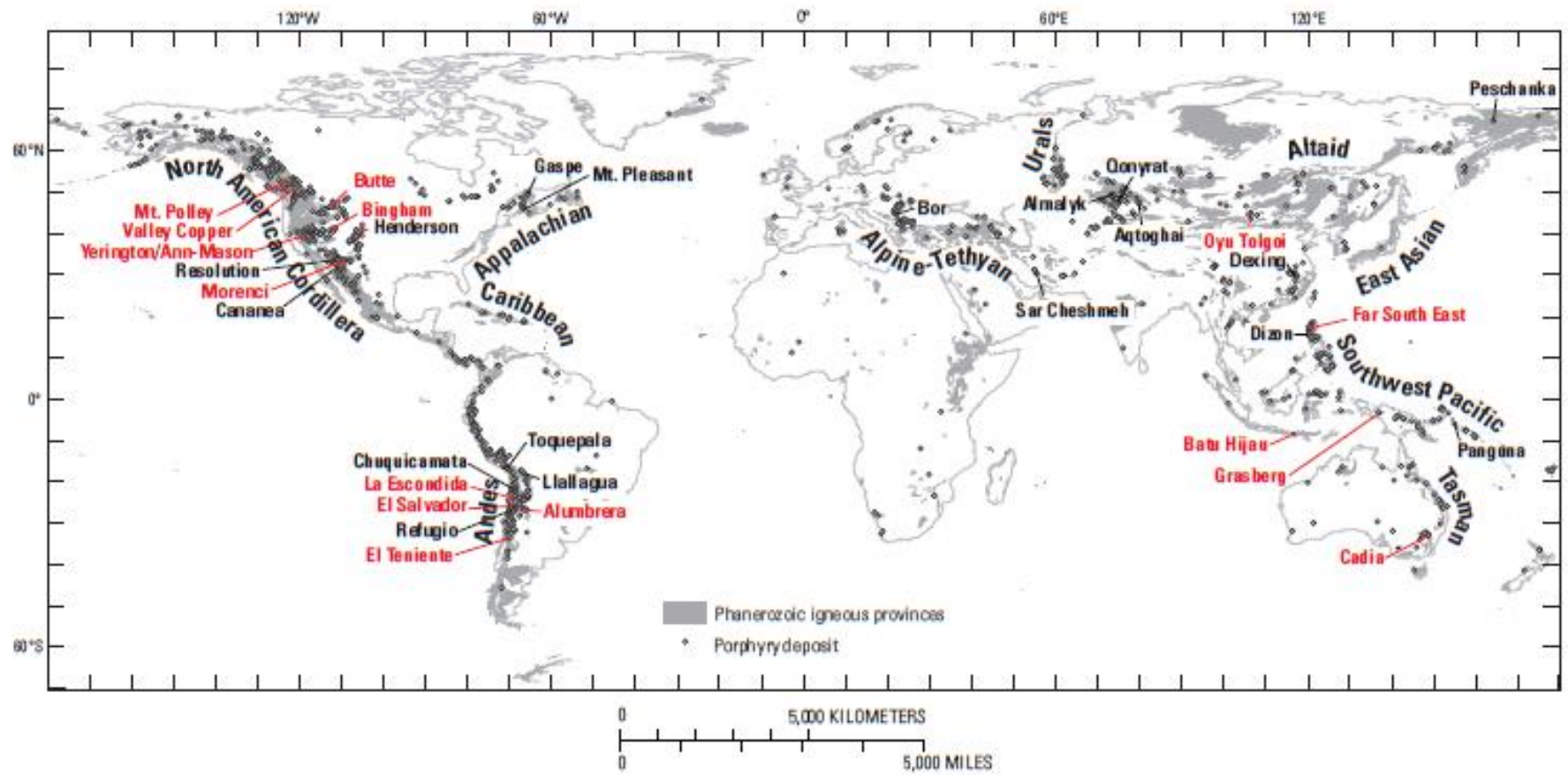
- Skarnlar (bakır, demir, altın ve çinko tipleri)
- Polimetalik ornatma (gümüş, kurşun, çinko, bakır ve altın)
- Polimetalik damarlar (altın, gümüş, bakır, kurşun, çinko, manganez, arsenik)
- Distal saçınımlı altın-gümüş (altın, gümüş)
- Epitermal damar (orta/düşük sülfidasyon altın-gümüş)
- Yüksek sülfidasyon epitermal (altın, gümüş, bakır, arsenik)

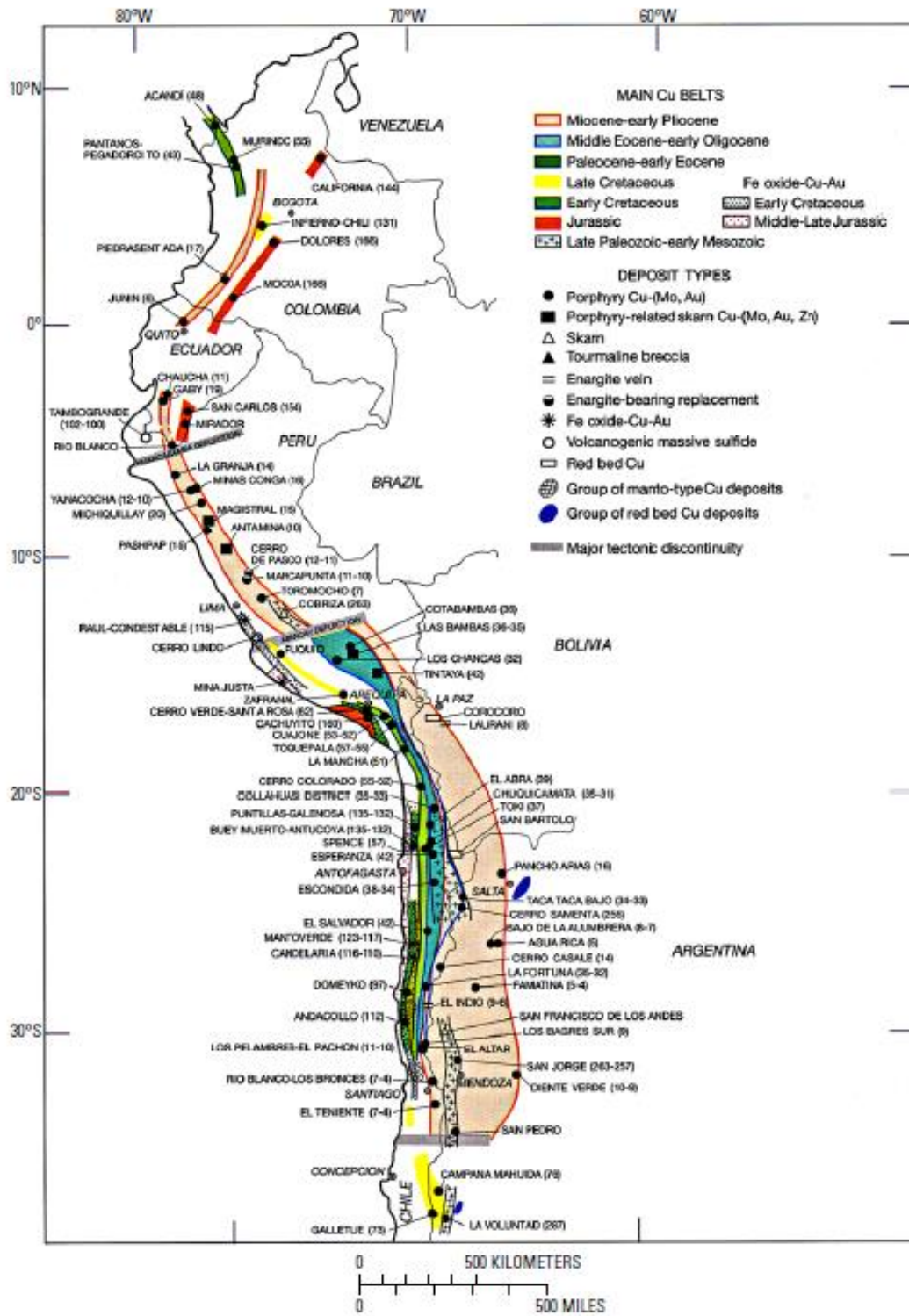
Bölgesel ortam

PBY'nin bölgesel, yatak-bazlı ve yerel-ölçekli oluşum ortamları oldukça farklıdır. Porfiri bakır sistemleri oldukça yaygın olup zaman ve mekân açısından genellikle yaklaşan levha sınırlarındaki magmatik yayların oluşumu ile sınırlıdır. Bu bölgelerde, dalan okyanus kabuğu ve yay magmatizması sulu, oksitlenmiş cevherlerle kökensel ilişkili granitoidleri üretir. Bazı PBY'ler yitim sonrası magmatik ortamlarda hem açılma hem de sıkışma rejimleri altında oluşurlar. Yitim sonrası ortamlarda oluşan magmalar küçük hacimli, mekânsal olarak sınırlı ve hafifçe alkalin (yüksek K ± Na kalk-alkalin) ile oldukça alkalin bileşimlidir. Buna istisna gösteren yataklar da vardır, örneğin dünyanın en büyük PB (altın) yataklarından olan Grasberg yatağı (Endonezya). PBY yerkürenin değişik zaman dilimlerinde oluşmuştur ancak çoğunlukla üst kabukta ve tektonik olarak duraysız yaklaşan levha sınırlarında geliştiği (5–10

km'den daha az) ve büyük ölçüde erozyona maruz kaldığı için bilinen yatakların %90'dan fazlası Mesozoyik ve Senozoik yaşlıdır. Çatlak ve damar sistemleri ile breşler porfiri magmatizmasının en önemli sonuçlarından. Çevreleyen kabuğa göre daha az yoğun olan ortaç-silisik ve sulu karakterli magmalar üst kabuğa doğru kolaylıkla yükselirler. Yoğunluk farkının azaldığı yerlerde magmalar plüton veya batolit oluşturmak üzere yığılırlar. Magmanın soğuması, kristalleşmesi ve katılaşması uçucuların (sulu akışkanlar) ayrılmasına yol açar.







Yatakların fiziksel özellikleri

PBY'nın boyut ve geometrisi çeşitli faktörler nedeniyle oldukça değişkendir: cevherleşme sonrası oluşan intrüzyonlar ve yatak morfolojisi ile süperjen ve hipojen cevher miktarını etkileyen konak kayalık çeşidi. PBY genellikle küçük silindirik porfiri stoklar veya dayk

fırtınası etrafında yoğunlaşmıştır. Cevherle ilişkili intüzyonların kapladıkları alan 0.2 ile 0.5 km² arasında değişir. Deformasyon geçirmemiş plütonlar yarıçapı 0.1-1.0 km arasında olan ve yatay ve düşey boyutları birbirine yakın olan dairesel veya eliptik şekildedir. Yatakların kesitlerine bakıldığında, cevherli zonların merkezi kısımları düşük tenörlü, altere silindirik kabuktan bunları çevreleyen çok sayıda domun eşlik ettiği ters kupa şekilli çekirdek bölmesine veya düşey olarak uzanan eliptik biçimlere kadar değişen bicinler aldığı görülür. Hipojen bakır cevherinin düşey uzanımı genellikle 1-1.5 km arasındadır. Bakırca-zengin kayaç birkaç km derine kadar uzandığından cevher taban derinliği bakır tenörü, bakırın piyasa fiyatı, madencilik maliyeti ve maden işletme tasarımına bağlıdır. Süperjen bakır cevherinin düşey uzanımı ise nadiren 200 metreyi bulur.

Porfiri bakır sistemi ile ilişkili ısı veya akışkanın etkilediği toplam kaya hacmi genellikle cevherli zonlar veya yüzeyde görülen altere kayaç alanlarından tahmin edilen boyutlardan çok daha fazladır. Altere kayaç kütlesi PB cevherleşmesi merkezinden itibaren 10 km kadar uzanmakta derinlik ise paleo yüzeyden itibaren 10 km aşağıda olabilir.

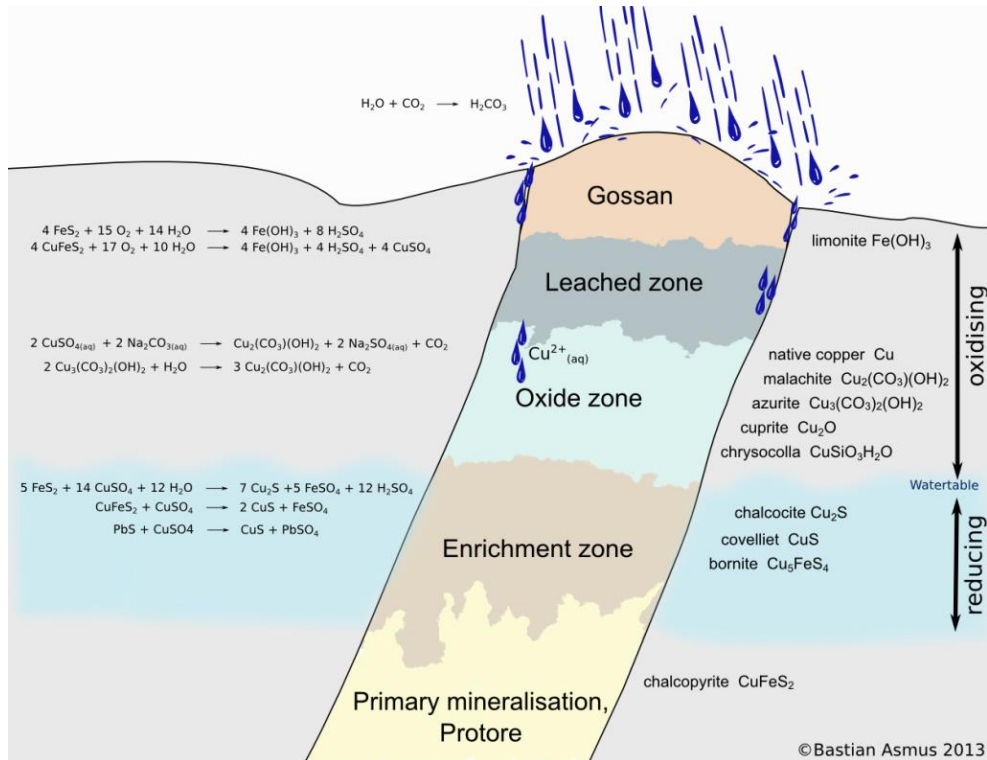
Hipojen cevher özellikleri

PBY'larındaki cevher, içindeki bakır, molibden ve bazen altın konsantrasyonu, değeri, lokasyonu ve üretilmesi ekonomik koşullarda uygun olan kayacı kapsar. Hipojen cevherdeki başlıca mineraller yatakların hemen hemen tamamında gözlenen kalkopirit ve yatakların ¼'nde bulunan bornittir. Yatakların %70'inde görülen molibdenit önemlidir. Yatakların %30'nda gözlenen beraber veya yan ürün olarak oluşan altın ve gümüşün bornite ve kalkopirit içinde biriktiği, yan ürün olarak oluşan renyumun ise molibdenitten kaynaklandığı ortaya konmuştur. Bakır ve molibden ile birlikte görülen diğer hipojen mineralleri kuvars, pirit, serizit (muskovit, K-mika), klorit, epidot, biyotit, K-feldispar, manyetit ve anhidrittir. Bazı PBY'ında hipojen cevher tennantit/tetrahedrit, enarjit ve kovelin gibi Cu minerallerinden oluşmaktadır ve serizitik ve ileri arjilik alterasyon zon içinde kuvars, pirit, serizit, kaolinit, alünit ve profillit mineralleri görülür. Hipojen cevher hacminin %1-2'ne karşılık gelen Cu-Mo mineralleri çeşitli şekillerde oluşur: (1) konak kayaçlar içinde saçılmış halde feldispat ve diğer mineralleri ornatan 1 mm boyutunda özşekilli-yarıözşekilli kristaller veya hidrotermal biyotit ve diğer silikat, sülfat ve oksit mineralleri ile beraber mm-cm ölçeğinde pıhtı-benzeri agrega şeklinde, (2) <1 mm-birkaç cm genişliğinde damarlar içinde mikron-mm boyutunda kuvars, pirit ve diğer hipojen mineraller ile birlikte ve (3) breş matrisi içinde kuvars ve diğer hipojen mineraller ile birlikte. Bu üç oluşumdaki bakır, molibden ve diğer hipojen mineraller, intrüzyon ve yan kayaçlar üzerinde gelişen zonlu alterasyon mineral birlikteliğinin bir parçasını oluşturur. Bakır tenörü ağırlık olarak yüzde 1'den fazla olup ortalama tenör %0.5 civarındadır. Üretim sırasında hipojen ve süperjen bakır tenörleri için ayırım yapılmamaktadır. Süperjen bakır sülfat tenörü zenginleşme nedeniyle genellikle hipojen bakır tenörlerinden daha yüksek olmakla birlikte süperjen oksit tenörleri hipojen bakır tenörlerinden yüksek veya düşük olabilmektedir. Ortalama bakır tenörünün 2002'de %0.49'den 2008'de %0.44'e düşmesi muhtemelen az miktarda süperjen cevherin işletildiğini, artan bakır fiyatlarıyla beraber her iki tür cevhere ait düşük tenörlü cevherlerin çıkarıldığını ve gelişen madencilik teknolojisi ile düşük-tenörlü bakır oksitlerden bakırın liç yöntemiyle ucuz olarak işletilmesi nedeniyle. Molibden tenörleri %0.001-0.1 arasındadır. 2002'de Mo tenörü %0.018

olmuştur. Molibden süperjen işlevlerle önemli oranda zenginleşmediğinden bu değer ortalama hipojen Mo tenörü olarak görülebilir. 2002 yılında bu yataklardaki ortalama Au ve Ag tenörleri sırasıyla 0.16 ve 2.67 g/t olarak hesaplanmıştır. Bu elementler için tenör 0-0.65 g Au/ton ve 0-10 g Ag/tondur.

Süperjen cevher özellikleri

Süperjen cevher, işletilebilir bakır mineralleri ile birlikte yeryüzüne yükselen ve hipojen bakır minerallerini çözüp onları düşük-sıcaklıklı, yükseltgen ortamlarda yeniden çökeltten düşük asiditeli yeraltı suyundan çökelen çok sayıda diğer mineralleri kapsar.



Hipojen bakır mineralleri ve diğer kayaç bileşenlerinin zenginleşme sırasında uzaklaştırıldığı üstteki poroz kayaç yıkanmış örtü (leached capping) olarak adlandırılır. PBY'nın günlenmesi ve zenginleşmesi kalın hipojen zon, fay, kırık, çatlak ve ağsal damar gibi yapısal unsurların neden olduğu geçirimsizlik, hipojen alterasyon zonlarının mineralojisi, pirit/bakır sülfid ve asid-tampon kapasitesi, erozyon ve oksitlenme hızları (iklim), tektonizma, topoğrafya ve zaman gibi birçok faktörler tarafından denetlenir.

Süperjen bakır oksit cevher zonları onlarca veya yüzlerce metre kalınlıkta olup onlarca-yüzlerce megaton kayaç kütlelerinde %0.3 – >1 bakır tenörü içerir. Zenginleşmiş bakır sülfid cevher zonları ise onlarca veya yüzlerce metre kalınlıkta olup onlarca megatondan 1.5 gigatona kadar değişen kayaç kütlelerinde %0.4–1.7 bakır tenörü içerir. Zenginleşmiş bakır sülfid cevherleri alttaki hipojen cevher veya bakırca zengin kayaca göre değişen oranlarda daha yüksek tenöre sahiptir. Ancak bakır oksit cevherli zonlarına ait tenör hipojen kaynaklardan düşük veya yüksek olabilmektedir. Bakırın oksit minerallerinden asit çözünme ve çözültiden çökeltme yolu ile ucuz şekilde kazanımı düşük-tenörlü oksit yataklarının işletilmesini sağlamıştır. Yıkanmış örtü kalınlığı oldukça değişkendir (çoğu PBY için 0 ile birkaç yüz metre arasında).

Oksit zonlardaki en önemli bakır mineralleri malakti, azurit, kübrit, tenörit, nabit bakır, atakamit, krizokol ve ayrıca çok sayıda diğer bakır oksit, silikat ve sülfat mineralleri de az oranda bulunur. Bu mineraller yıkanmış örtü içindeki kırık ve boşluklarda kristalen agrega ve kristal şeklinde oluşurlar. Bakır oksit cevherleşmelerinde gözlenen karmaşık parajenetik ilişkiler ve denge dışı mineral birliktelikleri günlenme sırasında ortaya çıkan değişen kimyasal koşulların göstergesidir. Zenginleşmiş sülfid cevherindeki bakır genellikle kurum renkli, ince taneli kalkozin içinde olup daha az miktarda bakır ise kovelin ve minerallerinden Cu_xS_y türer.

Table L2. Minerals commonly found in the oxide zone of porphyry copper deposits (adapted from Chávez, 2000).

Alunite	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$
Antlerite	$Cu_3SO_4(OH)_4$
Atacamite (paratacamite, botallackite)	$Cu_2Cl(OH)_3$
Azurite	$Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$
Bonattite	$CuSO_4 \cdot 3H_2O$
Brochantite	$Cu_4SO_4(OH)_6$
Ceruleite	$Cu_2Al_7(AsO_4)_4(OH)_{13} \cdot 12H_2O$
Chalcanthite (compare to kröhnkite)	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$
Chalcocyanite (compare to turquoise)	$CuFe_6(PO_4)_4(OH)_4 \cdot 4H_2O$
Chenevixite	$Cu_2Fe^{2+}(AsO_4)_2(OH)_4 \cdot H_2O$
Chrysocolla (mineraloid)	$Cu(Fe,Mn)O_2 \cdot SiO_2 \cdot H_2O$, with copper content varying from about 20 to 40 weight percent Cu
Copiapite	$Fe_3(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$
Coquimbite	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$
Goethite	$\alpha\text{-FeOOH}$
Jarosite	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
Kröhnkite	$Na_2Cu(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$
Lavendulan	$NaCaCu^{++}(AsO_4)_4Cl \cdot 5H_2O$
Libethenite	$Cu_2PO_4(OH)$
Malachite	$CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$
Paramelaconite	Cu_4O_3 (see tenorite (CuO) and cuprite (Cu_2O))
Poitevinite	$(Cu,Fe,Zn)SO_4 \cdot H_2O$
Posnjakite	$Cu_4SO_4(OH)_6 \cdot H_2O$
Pseudomalachite (see libethenite)	$Cu_3(PO_4)_2(OH)_4$
Scorodite (see chenevixite)	$FeAsO_4 \cdot 2H_2O$
Turquoise	$CuAl_6(PO_4)_4(OH)_4 \cdot 4H_2O$
Voltaite	$K_2Fe_6Al(SO_4)_{12} \cdot 18H_2O$
Wroewolfeite (Langite)	$Cu_4SO_4(OH)_4 \cdot 2H_2O$

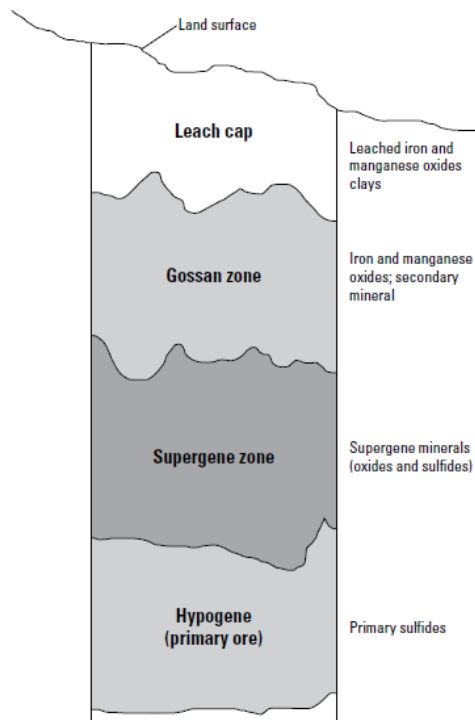
Hipojen ve Süperjen gang özellikleri

Porfiri bakır cevheri (%98'den fazla) değersiz veya gang minerallerden oluşur. Bu malzemeler bakır, molibden, altın ve gümüş kazanımı sırasında uzaklaştırılır. Gang mineralleri ekonomik olmayacak ölçüde Cu ve Mo barındıran konak kayacın ilksel mineralleri, hidrotermal mineraller ve süperjen minerallerden oluşur. Bakır veya molibden içermeyen (%100 gang mineralleri) veya süreç edilemeyecek kadar az Cu ve Mo içeren kayaç atık olarak tanımlanır. Hipojen ve süperjen işlemlerle oluşan gang mineralleri yerine aldığı ilksel kayaç

yapıcı minerallere ve hipojen hidrotermal minerallere göre daha düşük yoğunluğa sahiptir. Mineral çözünme ile oluşan boşluklar ile birlikte düşük-yoğunluklu gang mineralleri cevher ve atığın fiziksel dayanımı düşürür ve maden tasarımı etkiler.

Hipojen gang plajiyoklaz, K-feldispat, kuvars, mikalar, klorit, epidot, amfiboller, piroksenler, kalsit, granat, Al-silikat ve sülfat mineralleri (kaolinit, illit, alünit, andalusit ve profillit) ve sekonder mineraller (demir-titan oksitler, apatit ve zirkon) gibi ilksel kayaç yapıcı ve hipojen hidrotermal minerallerden oluşur. Çok sayıda diğer hidrotermal silikat, oksit, sülfat, fosfat ve karbonat mineralleri ise hipojen hidrotermal gangı oluşturur. İlksel kayaç yapıcı minerallerinin dağılımı PBY'nı oluşturan kayaç türlerinin dağılımını takip eder ancak hipojen hidrotermal gang mineralleri Cu, Mo ve alterasyon minerallerinin zonlanması ile uyumluluk gösterir. Hipojen gang mineralleri doku ve tane boyu genellikle konak kayaçlar ile benzer olsa da, primer konak kayaç dokuları ve tane boyları değişen oranlarda alterasyon işlevleri (çok ince taneli ve düşük-yoğunluklu mineral agregaları) ile denetlenir.

Süperjen gang ilksel kayaç yapıcı mineraller, hidrotermal mineraller ve silika fazları (kalsedon, opal), kaolinit, illit, montmorillonit, alünit, limonit (götit, hematit, jarosit) ve mangan oksitler gibi günlenme ile oluşan minerallerden oluşur. Götit, jarosit ve çoğu mangan oksit mineralleri dışında, hipojen ve süperjen gang mineralleri genellikle aynıdır, bunların birlikte kaolinit, illit ve silika mineralleri ilave edilir ve bunlar yerel ölçekte hipojen mineralleri ornatırlar. Süperjen gangın doku ve tane boyu genellikle günlenme ve zenginleşme döngülerini yansıtır. Yüzeğe yakın olan bakır oksit cevherinde, süperjen gang kalıntı ve türedikleri kayaç parçalarına ait düşük-yoğunluklu ve poroz, ince-çok ince taneli agregalardan (silika, kaolinit ve limonit) oluşur (cevherli yıkanmış örtü). Oksit cevher altındaki zenginleşmiş-süperjen bakır sülfid cevherinde, gang daha önce oluşmuş süperjen mineraller ve ilksel kayaç yapıcı minerallerden meydana gelmiştir ve gang dokusu konak-kayaç dokusuna benzer.



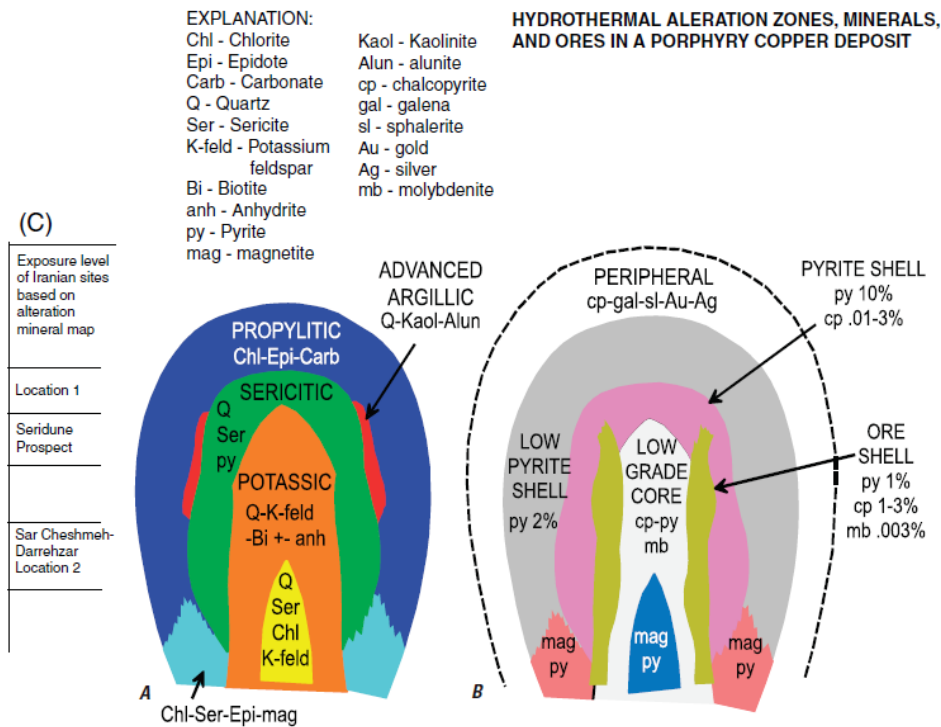
PBY'ndeki cevher büyük ölçüde hipojen ve süperjen gang minerallerinden oluşur, gangların fiziksel ve kimyasal özellikleri ile Cu-Mo-Au tenörü PBY'nının işletilmesini belirler.

Sertlik, çatlaklılık ve damar sıklığı ve patlatma ve öğütme sonrası tane boyu dağılımı gibi fiziksel özellikler madencilik donanım gerekliliklerini, cevher/atık sıyırma oranları (ocak şevi), patlatma deliği sıklığı, öğütme kapasitesi ve değirmen tasarımını belirler.

Hidrotermal alterasyon

Hidrotermal alterasyon bir porfiri bakır sistemi oluşturan kayaçların bileşim, mineraloji ve dokusunu değiştiren metasomatik süreci tanımlar. Porfiri ortamlarda, yan kayaç alterasyonu hacim olarak cevherin %1-5'ni oluşturan ve genişlikleri 0.1-10 cm olan dar damarlar ile yakından ilişkilidir. Hidrotermal alterasyon iyonik metasomatizma ve hidrolitik (veya asidik) tepkimeler, oksitlenme-indirgenme tepkimeleri (sülfitleşme dahil), çözünürlük kaynaklı çökeltme tepkimeleri (kuvars çökeltmesi) ve suyun veya karbonatın ilave olduğu hidrasyon-karbonatlaşma tepkimeleri ile temsil edilir.

Porfiri bakır cevherli zonlarında çok sayıda yan-kayaç alterasyon türleri görülür. Bu alterasyon tipleri yatak merkezinden itibaren dışarı ve yukarıya doğru birkaç km uzanır ve zamansal ve mekânsal olarak zonlanma gösterirler. PBY'nda görülen başlıca alterasyon türleri (1) potasik, (2) serizitik, (3) ileri arjilik, (4) orta arjilik, (5) propilitik, (6) sodik-kalsik ve sodik, (7) greyzen ve (8) skarn.



Potasik alterasyon K-feldispat ve biyotit gibi ornatma ve damar potasyum fazlarını kapsar. K-feldispat silisik veya granitik yan kayaçlarda baskın potasyum mineraliyken biyotit ise ortaç veya mafik bileşimli kayaçlarda yaygındır. Bu alterasyon tipindeki sülfid mineralleri arasında bornit, kalkopirit ve pirit sayılabilir. Manyetit, molibdenit, anhidrit veya kalsit bunlara eşlik eder. Potasik alterasyon kuvarsça zengin stokwork damarlarıyla doğrudan ilişkilidir.

Serizitik alterasyon yapısal kontrollü damarlar boyunca genişliği birkaç cm olan damarlar oluşturur. Bu damarların yakın aralıklı olduğu yerlerde alterasyon 1 km³'e kadar varan

hacimde etkili olmaktadır. Sülfidler, potasik cevheri yukarı veya dışarı yönde kesen merkezdeki kalkopiritce zengin damarlardan pirit-kalkopirit ve piritçe baskın damarlara kadar belirgin şekilde zonlanmıştır. Geç-evre damarlar piritçe zengin olup cevher zonunun altı da dâhil olmak üzere bütün seviyelerde oluşabilir. Serizitik alterasyona ait damarlar, ince taneli beyaz K-mika (serizit) ve kuvarsin ve bunlara eşlik eden pirit ve speküler hematitin ornattığı her tür kayaç türüyle temsil edilir.

İleri arjilik alterasyon yoğun hidrolitik alterasyon ve alkali-karakterli katyon yıkanmasına karşılık gelir. Bu alterasyon serbest sulu alüminyum silikat mineralleri (azalan termal duralılık sırasına göre profillit, dikit ve kaolinit), yüksek t zonlarında yerel olarak andalusit, alünit ve topaz, diyaspor, korund gibi çeşitli alüminyum, flor ve silikaca zengin mineraller ve pirit oluşturur. Al'un uzaklaştırıldığı kuvarşça zengin zonlar (kalıntı silika alterasyonu) yüzeye yakın zonlarda yaygındır. Hipoejn sülfidler pirit ve enarjit, kovelin, dijenit ve az miktarda tetrahedrit/tennantit gibi bakır minerallerinden meydana gelir.

Orta dereceli arjilik alterasyon su etkinliğinde oluşan kil içeren mineral birlikteliğini temsil eder. Bu alterasyon serizitik alterasyondan daha düşük sıcaklıkta gelişmiştir. Ortamın pH değeri serizitik alterasyona göre düşük ancak ileri arjilik alterasyona göre yüksektir. Bu alterasyonda, smektit veya kaolinit plajiyoklazı ornatır, magmatik K-feldispat duraylıdır ancak ferromagnezyem mineraller klorit ve pirit tarafından yer değiştirilir.

Profillik alterasyon magmatik kayaçların hidrasyon, karbonatlaşma, oksitlenme ve yerel olarak sülfidasyon tepkimeleri ile sulu minerallere ve çok az oranda karbonat, sülfid ve hematite dönüşümünü ifade eder. Tipik mineral birlikteliği epidot, klorit veya aktinolit ve bazı durumlarda yüksek sıcaklıkta pirit, klorit, illit-serizit veya smektit veya smektit. Düşük sıcaklıkta pirit kalsik plajiyoklazı ve ferromagnezyem mineralleri ortanabilir. Hipjen Cu mineralleri profilik alterasyonda pek yaygın değildir.

Sodik-kalsik ve sodik alterasyon, sodyum ve kalsiyum minerallerinin ortama eklendiği ve potasyum ve demir minerallerinin ise bozulduğu güçlü alkali alterasyonu ifade eder. Buradaki tipik alterasyon tepkimeleri K-feldispatın Na'ca zengin feldispat tarafından ve Ca-Fe-Mg minerallerinin ise K-mika tarafından ornatılmasını kapsar. Sodik-plajiyoklaz, aktinolit, epidot, klorit ve titanit sisteme eklenen minerallerdir. Kalsik-piroksen, kalsik-plajiyoklaz ve Ca-Al-Fe granat ise yüksek sıcaklıkla oluşabilirler ($> 450^{\circ}\text{C}$).

Greyzen kristalen hidrotermal muskovitten oluşan damar ve zonları ifade eder. Greyzen muskovit, kuvars ve çok az oranda sülfid (pirit kalkopiritten daha fazla) ve K-feldispat ve muskovit zonları içeren damarlardan oluşur.

Skarn karbonat ve diğer yan kayaçları ornatın Ca-Fe-Mg silikat minerallerini ifade eder. Mg-silikat mineralleri, dolomitik protolitlerde Ca-Fe silikat mineralleri ise genellikle PBY barındıran kireçtaşı protolitlerde baskındır. Erken susuz skarn granat, granat ve Ca-ca zengin piroksen tarafından ornatılan karbonat minerallerinden oluşur. Geç aktinolit, susuz skarnı örten sulu skarn minerallerinin en tipik olanıdır ve kalkopirit-pirit, manyetit ve cevher mineralleri ile ilişkilidir. Hidrotermal alterasyon mineralleri zamansal ve mekânsal olarak zonlanma gösterirler. Hidrotermal alterasyon zonları düşey ve yatay yönde kilometre ölçeğinde dağılım gösterirler. Bu zonların geometrisinde kayaç bileşimi, derinlik ve daha geçirgen zonların yönelimine bağlı olarak belirgin bir değişim görülür. Potasik ve serizitik alterasyon PBY'daki sülfid mineralleşmesi ile ilişkili olup birbirlerine göre zamansal, mekânsal ve termal açıdan zonlanma gösterirler. Merkezi kısımda yer alan potasik alterasyon serizitik alterasyona göre daha önce, daha yüksek sıcaklıkta ve daha derinde oluşmuştur. İleri arjilik ve serizitik alterasyon akışkan kanalları çevresinde zonlanma yaparken ileri ve orta dereceli arjilik alterasyonlar ise düşük-sıcaklıklı ve yüzeye yakın kuvars-alünit ortamında birbirlerine

bitişik olarak görülür. İleri arjilik alterasyon genellikle potasik ve serizitik alterasyon zonlarını örter. Bazı PB sistemlerinin derin kısımlarında greyzen katmanlı damarlar oluşturur. Bazı PBY'nın kenarları boyunca veya derin kısımlarında sodik-kalsik ve sodik alterasyon ortaya çıkabilir. PB sistemlerdeki profilitik alterasyon genellikle sığ-orta derinliklerde ileri arjilik, serizitik ve potasik alterasyonların kenar veya merkezi kesimlerinde oluşur. Profilitik zonlar sodik-kalsik ve sodik alterasyon zonlarının derin kısımlarına doğru derecelenme gösterir.

Cevher yatağı kökeni

Jeolojik ve jeokimyasal bulgular porfiri bakır sistemlerin esas olarak porfiritik granitoyidik plütonların sığ ortamlarda yerleşimi sırasında açığa çıkan magmatik akışkanlar tarafından oluştuğunu göstermektedir. PBY'nın oluşumu magma üretimi, diferansiyasyon, magma yerleşmesi, kristalizasyon ve gaz salınımı, salınan gazlar ile kristalleşmiş intrüzyonlar, yan kayaçlar ve meteorik ve diğer magmatik olmayan sular arasındaki yüksek-T tepkimeleri, düşük-T meteorik sular ile önceden oluşmuş yüksek-T mineralleri arasında yüzeye yakın alanlarda gerçekleşen reaksiyonların da dahil olduğu bir dizi karmaşık süreçle ilişkilidir.

Akışkanların kaynağı

Jeokimyasal çalışmalara göre, intrüzyonlar ile bunların ve yan kayaçlar bünyesindeki zonlu, yüksek-sıcaklıklı damar ve alterasyon mineral birliktelikleri arasında güçlü bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Buna göre, PBY'nı oluşturan akışkanlar bileşenleri (metaller, su, kükürt, klor) magmatik bir kökene sahiptir. Ayrıca, izotop, sıvı kapanımı ve ergiyik kapanımları üzerinde yapılan araştırmalar sığ derinde yerleşen intrüzyonların kristalleşmesi sırasında açığa çıkan bu yüksek-sıcaklıklı akışkanların magmatik kökenli olduğunu göstermiştir. Aslında PB sistemlerin birçoğunu oluşturan çözeltilerin magmatik ve dışsal kökenli meteorik akışkanlardır. Hidrotermal aktivitenin sönümlendiği dönemde düşük sıcaklık ve düşük hidrostatik basınç altında meteorik akışkanlar sisteme kolaylıkla dahil olabilmektedir. Sedimanter salamuralar bazı PB sistemlerin ilk aşamasında sodik ve sodik-kalsik alterasyona neden olurlar.