بسمه تعالی

بررسی روش‌های نوین استحصال مس از منابع کم عیار سولفیدی با در نظر داشتن ملاحظات زیست محیطی، مصرف انرژی و کاهش عیار ذخایر جهانی

سخنران: دکتر مهدی قراباغی

مدیر پژوهش‌های کاربردی دانشکده فنی دانشگاه تهران

مهر ۱۳۹۷

بیان مساله

- با افزایش جمعیت انسان‌ها و توجه به زندگی با استانداردهای بهتر سبب شده است که تقاضا برای استخراج سنگ‌های معدنی از جمله مس در دنیا روند صعودی داشته باشد.

- افزایش استخراج سبب شده است که ذخایر با عیار بالای مس در محدودیت قرار بگیرند و لذا شرایط ایجاب می‌کند که به سمت ذخایر با عیارهای کمتر مس برویم.

- فرآیندهای استحصال مس از سنگ معدن به گونه‌ای است که کاهش عیار مس سبب افزایش هزینه‌های تولید، افزایش تنش‌های زیست محیطی، افزایش در میزان مصرف انرژی و کاهش سودآوری فرآیندهای تولید شده است.

- لذا ضرورت دارد که روش‌های استحصال مس از ذخایر کم عیار بهینه‌سازی شود و در مراحل بعد روش‌های نوین معرفی گردد.

مشکلات و بحران‌ها

- در مضیقه قرار گرفتن منابع پر عیار مس بر اثر افزایش برداشت از معادن، و در نتیجه کاهش ذخایر مس با عیار بالا
- نیاز به خردایش و نرمایش بیشتر مس عیار پایین به منظور رسیدن به درجه آزادی بیشتر، در نتیجه افزایش مصرف انرژی
- افزایش مصرف انرژی از جمله در فرآیندهای پیرومتالورژی موجب تولید گازهای آلاینده بیشتر شده و خطرات زیست محیطی جدی را پدید خواهد آورد.
- افزایش مصرف انرژی و در ادامه آن افزایش گازهای آلاینده موجب کاهش در سودآوری فرآیند تولید شده و لذا تولیدکنندگان چندان علاقه‌ای برای سرمایه گذاری در این بخش را نخواهند داشت.

بررسی تقاضای فلز در آینده

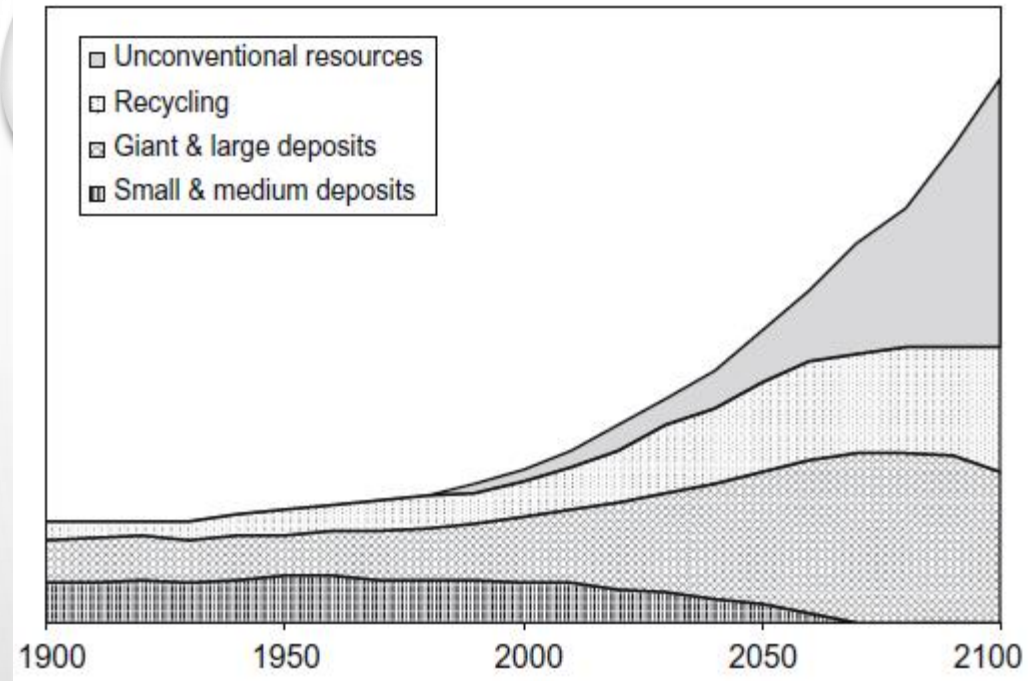


Fig. 1. Projected future metal supplies (Laznicka, 2006).

بررسی‌ها نشان از افزایش تقاضا برای فلز از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۸ را می دهد.

درضمن افزایش تقاضای فلز تا سال ۲۱۰۰ به صورت صعودی در حال افزایش است

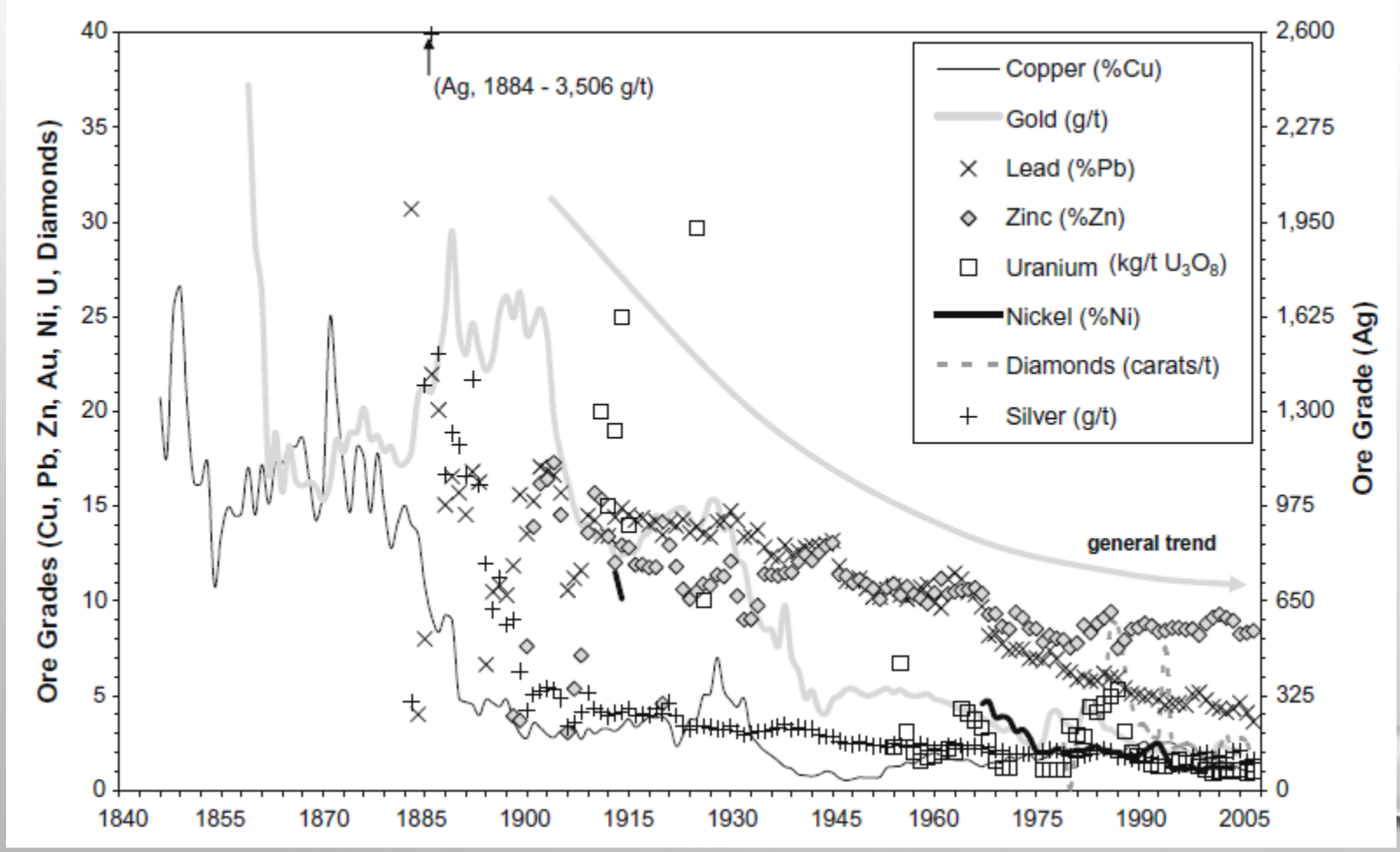
بررسی عیار اقتصادی فلزها

Metal	Economic ore grade (%w/w)	Reserves (Mt of metal)	Production in 2006 (Mt/y)[a]	Years of supply[b,c]
Iron/steel	30–60	79,000	858	92
Aluminium	27–29	4675	33	142
Copper	0.5–2	480	15.3	31
Lead	5–10	67	3.4	20
Zinc	10–30	220	10	22
Nickel	1.5–3	64	1.6	40

همانطور که در جدول روبرو مشاهده می‌شود عیار اقتصادی مس در حال حاضر بین ۰/۵ تا ۲ درصد است و با کاهش عیار به ۰/۱ درصد غیر اقتصادی خواهد بود.

* میزان تغییرات کاهشی در عیار فلزها در سال‌های متوالی (استرالیا)

نمودار مقابل نشان می‌دهد که مقدار عیار مس در ذخایر استرالیا از سال ۱۸۴۰ تا ۲۰۰۵ روند کاملا نزولی داشته است.



* تاثیر کاهش عیار مس بر میزان انرژی مصرفی در فرآیندهای مختلف استحصال

با کاهش عیار مس از ۳ درصد به ۰/۱ درصد، میزان مصرف انرژی در فرآیندهای مختلف تولید مس بر حسب مگاژول بر کیلوگرم مس افزایش داشته است. این فرآیندها شامل تغلیظ و ذوب، ذوب مستقیم، هیپ لیچینگ، لیچینگ فشاری و لیچینگ برجا است.

Processing route	Copper					
	Ore grade (% Cu)					
	0.1	0.25	0.5	1.0	2.0	3.0
Concentrating and smelting						
– 75 μm (grind size)	602	249	131	72	43	33
– 5 μm (grind size)	1165	474	244	129	71	52
Direct smelting	954	385	195	100	–	–
Heap leaching	791	332	179	103	64	52
Pressure leaching	1182	469	267	153	96	77
In situ leaching	1345	554	290	158	–	–

* تاثیر کاهش عیار مس بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرآیندهای مختلف استحصال

با کاهش عیار مس از ۳ درصد به ۰/۱ درصد بر مقدار انتشار گاز دی اکسید کربن بر حسب kg CO_2/kg Cu در مراحل مختلف تولید مس افزوده می‌شود.

Processing route	Copper				
	Ore grade (% Cu)				
	0.1	0.25	0.5	1.0	2.0
Concentrating and smelting					
– 75 μm (grind size)	56.8	23.6	12.5	7.0	4.2
– 5 μm (grind size)	111.0	45.3	23.3	12.4	6.9
Direct smelting	92.2	37.3	19.0	9.8	–
Heap leaching	74.5	31.3	17.0	9.8	6.2
Pressure leaching	115.0	49.7	27.9	17.0	11.6
In situ leaching	129.5	53.3	27.9	15.2	–

روش‌های مرسوم استحصال

- از جمله روش‌های مرسوم می‌توان به هیپ لیچینگ سنگ‌های کم عیار سولفیدی مس اشاره کرد که تا عیار ۰/۱۵ درصد را پوشش می‌دهد. در این روش سنگ معدن به طور متوسط باید تا ۱۰ میلیمتر خردایش شود و معمولا از لیچینگ باکتریایی استفاده می‌شود.
- روش دیگر استفاده از لیچینگ تحت فشار است که در دمای بالای ۲۰۰ درجه سانتیگراد انجام می‌گیرد. ولی مواد باید تا زیر ۱۵۰ میکرون خردایش شوند و با کاهش عیار مس دچار مشکل خواهد شد. در ضمن سینتیک بسیار آهسته‌ای دارد.
- لیچینگ برجا روش دیگری است که برای عیارهای پایین سولفیدی مس استفاده می‌شود. این روش وابستگی شدیدی به ماهیت کانی شناسی سنگ کم عیار دارد و معمولا بسیار زمانبر هستند و برای ظرفیت‌های بالا پیشنهاد نمی‌شود.
- روش پیرومتالورژی که با ذوب کنسانتره مس سبب تولید مس قابل فروش در بازار می‌شود. در نتیجه برای مس کم عیار به علت کاهش عیار مس، مصرف انرژی و در نتیجه میزان تولید گازهای آلاینده بسیار بالاست.
- روش بایولیچینگ که از میکروارگانیسم‌ها برای انحلال مس استفاده می‌کند. از مزایای این روش استفاده از یک فرآیند دوستدار محیط زیست و سادگی در عملیات اجرایی است.

کاهش اثرات زیست محیطی و مصرف انرژی

تاریخچه‌ای از روش‌های هیدرومتالورژی مس

بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۵ میلادی روش‌های هیدرومتالورژی جایگزین روش‌های حرارتی شد تا زمینه کاهش میزان مصرف انرژی و کاهش گازهای گلخانه‌ای از جمله SO_2 را فراهم سازد. در جدول زیر تعدادی از این روش‌ها که در فرآیندهای تولید مس از سنگ سولفیدی و یا کنسانتره سولفیدی استفاده شده است، مشاهده می‌شود.

Operating Period	Process Name	Plant Location	Leaching Agent
1970	Treadwell	Tucson, Arizona	Concentrated H_2SO_4
1970	Kennecott	Salt Lake City, Utah	Concentrated H_2SO_4
1970-74	Arbiter	Anaconda, Montana	Ammonia + O_2
1971-76	Sherritt-Cominco	Fort Saskatchewan, Alberta	Partial roasting followed by dilute H_2SO_4 leaching
1973	Lurgi-Mitterberg	Mühlbach, Austria	Dilute sulfuric acid + O_2
1976-1983	CLEAR	Suharita, Arizona	Cupric chloride
1988	CUPREX	Madrid, Spain	Acid + ferric chloride
1995	Escondida	Antofagasta, Chile	Ammonia + O_2

ارزیابی روش‌های مرسوم در تولید مس کم عیار(<۰/۵ درصد)

- نتیجه ارزیابی‌ها نشان داد بهترین گزینه‌ها از دیدگاه مصرف انرژی به شرح زیر است:

۱. روش فرآوری ذوب (حدود ۶۰۲ مگاژول بر کیلوگرم مس)

۲. هیپ لیچینگ (حدود ۷۹۱ مگاژول بر کیلوگرم مس)

۳. ذوب مستقیم (حدود ۹۵٤ مگاژول بر کیلوگرم مس)

۴. لیچینگ تحت فشار(حدود ۱۱۸۲ مگاژول بر کیلوگرم مس)

۵. لیچینگ برجا (حدود ۱۳٤۵ مگاژول بر کیلوگرم مس)

ارزیابی روش‌های مرسوم در تولید مس کم عیار (۰/۱ درصد)

- نتیجه ارزیابی‌ها نشان داد بهترین گزینه‌ها از دیدگاه مسایل زیست محیطی به شرح زیر است:

۱. روش ذوب کنسانتره فلوتاسیون (حدود ٥٦/٨ کیلوگرم دی اکسیدکربن بازای کیلوگرم مس)

۲. هیپ لیچینگ (حدود ٧٤/٤ کیلوگرم دی اکسیدکربن بازای کیلوگرم مس)

۳. ذوب مستقیم بدون مرحله فلوتاسیون (حدود ۹۲/۲ کیلوگرم دی اکسیدکربن بازای کیلوگرم مس)

۴. لیچینگ تحت فشار (حدود ۱۱۵ کیلوگرم دی اکسیدکربن بازای کیلوگرم مس)

۵. لیچینگ برجا (حدود ۱۲۹/۵ کیلوگرم دی اکسیدکربن بازای کیلوگرم مس)

ارزیابی روش‌های مرسوم

- نتیجه ارزیابی‌ها نشان داد بهترین گزینه‌ها از دیدگاه بازیابی مس به شرح زیر است:

۱. ذوب مستقیم بدون مرحله فلوتاسیون (حدودا ۹٤ درصد)

۲. روش ذوب کنسانتره فلوتاسیون (حدودا ۹۰ درصد)

۳. لیچینگ تحت فشار (حدودا ۸۵ درصد)

۴. هیپ لیچینگ (حدودا ٦۵ درصد)

۵. لیچینگ برجا (حدودا ۵۵ درصد)

نگرشی بر روش‌های ابداعی جدید (نیاز به یک مرحله تغلیظ سنگ مس)

- در این قسمت به برخی از روش‌های ابداعی در سال‌های گذشته برای استحصال مس اشاره می‌شود:
- روش ALBION : توسط گروه MM Holdings (now Xstrata) ابداع شده است. این روش شامل یک انحلال اکسیداسیونی اتمسفریک در دمای بالا و فشار اتمسفریک و در تانک همزن‌دار است. دارای بازیابی مس بین ۹۰ تا ۹۶ درصد است.
- روش BIOCOP™: توسط گروه BHP Billiton طراحی شده است. یک روش بایولیچینگ بر اساس میکروارگانیسم‌های مزوفیل (۴۲ درجه سانتیگراد) و ترموفیل (۷۲ درجه سانتیگراد) بر روی کنسانتره مس است. بازیابی بالای ۹۰ درصد دارد.
- روش SEPON: توسط شرکت Lane Xang Minerals LTD ابداع شده است. این روش بر مبنای انحلال فریک و سولفوریک است در تانکهای همزن‌دار است که موجب بازیابی مس به بالای ۹۰ درصد می‌شود.

نگرشی بر روش‌های ابداعی جدید (نیاز به یک مرحله تغلیظ سنگ مس)

- روش GEOCOAT™ : توسط گروه GEOCOAT ابداع شده است. در این روش از هیپ لیچینگ استفاده می شود. برای انحلال از میکروارگانیسم‌های ترموفیلیک استفاده شده است. بازیابی مس پس از ۹۰ روز در حدود ۹٤ درصد خواهد بود.

- روش HYDROCOPPER™: توسط شرکت Technology Outokumpu در کشور فنلاند ابداع شده است. این روش بر مبنای لیچینگ اتمسفری در دمای بالای ۸۰ درجه سانتیگراد است. گازهای آلاینده قابلیت مهار شدن دارند. سرمایه‌گذاری برای این روش در حدود ۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰ دلار بازای هر تن محصول تولید شده است.

- روش BRISA: این روش بر مبنای انحلال با میکروارگانیسم‌ها در دو مرحله است. مرحله اول شامل انحلال با اسید و یون فریک و نقره و مرحله دوم انحلال با میکروارگانیسم‌ها است.

مقایسه روش‌های کلاسیک و نوین

روش کلاسیک	بازیابی مس (٪)	معایب
ذوب مستقیم سنگ معدن	۹۵	مصرف انرژی بسیار بالا، آلایندگی بالا، عیار بالا
ذوب	۹۱	نیاز به پیش تغلیظ، مصرف انرژی بالا، آلایندگی
لیچینگ تحت فشار	۸۵	دمای بسیار بالا، خردایش زیاد، عیار بالا
هیپ لیچینگ	۶۵	بازیابی کم، زمانبر بودن
لیچینگ برجا	۵۵	بازیابی کم، زمانبر، ظرفیت پایین
بایو لیچینگ برای عیار کم	۶۵	بازیابی کم، زمانبر

روش نوین	بازیابی مس (٪)	محاسن
GEOCOAT™	۹۰-۹۵	بازیابی بالا، دمای ۷۰ درجه، عیار پایین، آلودگی پایین، مقیاس صنعتی
بایولیچینگ ستونی کنترل شده	۹۳	بازیابی بالا، دمای پایین اتمسفریک، خردایش کم (۱۵-۵ میلیمتر)، مناسب برای عیار پایین

جمع بندی

- اکثر فرآیندهای پیرومتالورژی مس برای عیارهای کم مناسب نیست. در ضمن بسیاری از فرآیندهای هیدرومتالورژی نیازمند مرحله تغلیظ و تولید کنسانتره مس دارند.

- ۱- استفاده از فرآیند فعالسازی مکانیکی سطح ذرات
- ۲- کاهش انرژی مصرفی، حفظ محیط زیست
- ۳- افزایش بازیافت
- ٤- فرآیندهای جدید ذکر شده و فرآیندهایی نظیر Activox™، Melt processes و Mitterberg Lurgi در مقیاس صنعتی

با تشکر از حسن توجه شما