

اکسید تیتانیوم

مقدمه و اهمیت راهبردی اکسیدهای تیتانیوم (TiO_2)

اکسید تیتانیوم یکی از مهم‌ترین مواد معدنی صنعتی جهان است که عمدتاً به صورت TiO_2 در کانی‌هایی مانند ایلمنیت و روتیل استخراج می‌شود.

کاربردهای اصلی:

- رنگدانه سفید در صنایع رنگ، پلاستیک و کاغذ
- صنایع هوافضا (پس از احیای فلز تیتانیوم)
- الکترودهای جوشکاری
- سرامیک‌های مهندسی و نسوزها
- کاربردهای فوتوکاتالیستی و زیست‌محیطی

اهمیت راهبردی: بازار جهانی TiO_2 وابسته به چند تولیدکننده بزرگ است و زنجیره ارزش آن از معدن تا تولید رنگدانه و فلز تیتانیوم گسترده است. کشورهایمانند استرالیا، آفریقای جنوبی و چین از تولیدکنندگان اصلی کنسانتره تیتانیوم هستند.

تیپ‌های کانساری اکسیدهای تیتانیوم

۱. کانسارهای پلاسر ساحلی

مهم‌ترین منبع جهانی ایلمنیت و روتیل
نمونه شاخص: Richards Bay Minerals

- تمرکز در ماسه‌های سنگین ساحلی
- استخراج کم‌هزینه با روش ثقلی

۲. کانسارهای ماگمایی لایه‌ای

همراه با مگنتیت - ایلمنیت

نمونه: Tellnes Mine

- عیار بالا

- استخراج روباز مقیاس بزرگ

۳. کانسارهای آذرین آنورتوزیتی

• همراه با اکسیدهای Fe-Ti

• پتانسیل تولید همزمان آهن و تیتانیوم

وضعیت بالقوه در ایران

پتانسیل TiO_2 در ایران عمدتاً در:

- کانسارهای ایلمنیتی-مگنتیتی

- برخی آنورتوزیت‌ها

- پلاسره‌های محدود جنوب و جنوب شرق

- همراهی با کانسارهای آهن تیتان‌دار

چالش اصلی: عیار اقتصادی TiO_2 و نسبت Fe/Ti تعیین‌کننده مسیر فرآوری است.

رویکرد پیشنهادی (فاز شناسایی)

در فاز اول پیشنهاد می‌شود:

• آنالیز کامل V_2O_5 , Fe_2O_3 , FeO , TiO_2

• تعیین فازهای کانی‌شناسی (XRD و MLA)

• تست جدایش مغناطیسی مرحله‌ای

• تعیین قابلیت ارتقاء عیار به بالای ۴۵-۵۰٪ TiO_2

• بررسی عناصر مزاحم (Cr_2O_3 , MgO)

تمرکز اصلی: قابلیت تولید کنسانتره قابل فروش در بازار جهانی

مسیر فرآوری پیشنهادی

- خردایش و دانه‌بندی
- جدایش مغناطیسی شدت پایین و بالا (تفکیک مگنتیت و ایلمنیت)
- فلوئتاسیون تکمیلی (در صورت نیاز)
- تولید کنسانتره ایلمنیت یا روتیل مصنوعی

در صورت توسعه زنجیره ارزش: فرآیند سولفات یا کلراید برای تولید رنگدانه TiO_2

عیار معمول

- کانسنگ اولیه: ۱۰ تا ۴۰ درصد TiO_2
- کنسانتره اقتصادی: بالای ۴۵ درصد (ایلمنیت)
- روتیل طبیعی: بیش از ۹۰ درصد TiO_2

قیمت جهانی

قیمت کنسانتره ایلمنیت وابسته به عیار و بازار چین است. روتیل طبیعی قیمت بالاتری دارد. بازار TiO_2 نسبت به فلزات گرانبها نوسان کمتر اما وابستگی شدید به صنعت ساخت‌وساز و رنگ دارد.

برنامه اجرایی پیشنهادی

- فاز اول – شناسایی (۶ ماه)
- نمونه‌برداری سیستماتیک
 - تست‌های مغناطیسی آزمایشگاهی
 - برآورد ذخیره مقدماتی

- فاز دوم – پایلوت (۹ ماه)
- طراحی مدار جدایش
 - تولید کنسانتره نیمه‌صنعتی
 - ارزیابی بازار فروش

- فاز سوم – اجرا
- احداث کارخانه فرآوری کنسانتره

- بررسی امکان تولید سرباره تیتانیوم یا Synthetic Rutile
- ارزیابی ورود به زنجیره رنگدانه در فاز توسعه

ایریدیوم

مقدمه و اهمیت راهبردی

ایریدیوم یکی از نادرترین عناصر گروه پلاتین (PGM) و فلزی فوق‌استراتژیک است. کاربردهای اصلی:

- الکترودهای مقاوم به خوردگی
- شمع‌های جرقه با عمر بالا
- صنایع هوافضا
- تولید کاتالیست‌های خاص
- تولید الکتروکاتالیزرهای هیدروژنی (IrO_2)

عرضه جهانی بسیار محدود و وابسته به چند معدن خاص است، بنابراین ریسک تأمین بالا می‌باشد.

تیپ‌های کانساری جهانی ایریدیوم

ایریدیوم تقریباً هرگز ذخیره مستقل ندارد و همراه با سایر PGM استخراج می‌شود.

کانسارهای لایه‌ای ماگمایی

مهم‌ترین منبع جهانی: Bushveld Complex

- همراه با Rh, Pd, Pt
- عیار معمولاً بسیار پایین (ppm تا بسیار کم)

کانسارهای Ni-Cu-PGE سولفیدی

نمونه: Norilsk

- ایریدیوم به‌صورت جزئی در کنسانتره Ni-Cu متمرکز می‌شود.

پلاسرهای PGM

در برخی موارد Ir در آلیاژهای طبیعی PGM دیده می‌شود.

وضعیت بالقوه در ایران

با توجه به نبود توده‌های لایه‌ای عظیم مشابه Bushveld، پتانسیل ایران احتمالاً محدود به:

✓ ذخایر Ni-Cu سولفیدی

✓ افیولیت‌ها و اولترامافیک‌ها

✓ برخی کرومیت‌های خاص

خواهد بود. ایریدیوم در مقیاس ppm یا کمتر حضور دارد و بدون وجود Pt/Pd اقتصادی نیست.

رویکرد پیشنهادی (فاز شناسایی)

در فاز اول پیشنهاد می‌شود:

- آنالیز کامل PGE (Pt, Pd, Rh, Ir, Ru)
- استفاده از Fire Assay با ICP-MS
- بررسی کنسانتره‌های Ni-Cu موجود
- تمرکز بر ذخایر سولفیدی دارای PGE بالا

مسیر فرآوری پیشنهادی

ایریدیوم در مراحل پالایش PGM جدا می‌شود:

فلوتاسیون برای کنسانتره سولفیدی

ذوب و تولید Matte

پالایش الکترولیتی

تمرکز PGM در لجن آندی

جداسازی شیمیایی عناصر PGM
بازیابی Ir به صورت نمک یا فلز (جداسازی Ir از پیچیده ترین مراحل پالایش PGM است).

عیار معمول

در کانسنگ: کمتر از ۰.۱ تا ۰.۵ گرم بر تن (اکثراً در سطح ppm پایین).

قیمت جهانی

قیمت ایریدیوم بسیار نوسانی است و در سال های اخیر بین 100,000 تا ۲۰۰,۰۰۰ دلار به ازای هر کیلوگرم در نوسان بوده است. حتی چند ده کیلوگرم تولید سالانه می تواند درآمد قابل توجه ایجاد کند، اما فقط در صورت وجود زنجیره کامل PGM دارای توجیه اقتصادی است.

برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول – شناسایی (۶ ماه)

- آنالیز جامع PGE
- بررسی ذخایر سولفیدی هدف

فاز دوم – پایلوت (۹ ماه)

- تست متالورژی
- بررسی تمرکز Ir در لجن آندی

فاز سوم – اجرا (در صورت اثبات اقتصادی بودن)

- اتصال به پالایشگاه PGM
- بازیابی Ir به عنوان محصول جانبی
- عدم احداث واحد مستقل ایریدیوم

پالادیوم

مقدمه و اهمیت راهبردی

پالادیوم یکی از عناصر گروه پلاتین (PGM) و فلزی بسیار استراتژیک است که کاربردهای اصلی آن شامل:

- کاتالیست خودرو (بیش از ۷۰٪ مصرف جهانی)
- صنایع پتروشیمی
- الکترونیک و آبکاری
- صنایع هیدروژنی
- کاربردهای دفاعی و شیمیایی خاص

تولید جهانی پالادیوم به شدت متمرکز است و عمدتاً در روسیه و آفریقای جنوبی انجام می‌شود، بنابراین امنیت تأمین آن برای بسیاری از کشورها چالش برانگیز است.

تیپ‌های کانساری پالادیوم در جهان

پالادیوم معمولاً ذخیره مستقل ندارد و در قالب PGM همراه با Ni-Cu یا Cr استخراج می‌شود.

کانسارهای ماگمایی Ni-Cu-PGE

- مرتبط با توده‌های اولترامافیک-مافیک لایه‌ای
- نمونه کلاسیک: Bushveld Complex
- حضور Pd همراه Pt

کانسارهای سولفیدی ماگمایی

- همراه با نیکل و مس
- نمونه: Norilsk
- Pd به عنوان محصول جانبی اصلی

کانسارهای کرومیتی با PGE

- همراه با لایه‌های کرومیت

- غلظت پایین ولی قابل بازیابی

وضعیت بالقوه در ایران

در ایران، احتمال وجود پالادیوم بیشتر در:

✓ ذخایر ماگمایی نیکل-مس

✓ کمربندهای اولترامافیک

✓ برخی ذخایر کرومیت

قابل بررسی است. با توجه به اینکه پالادیوم معمولاً ppm-level است، استخراج مستقل اقتصادی نیست و باید به عنوان محصول جانبی بررسی شود.

رویکرد پیشنهادی در فاز شناسایی

پیشنهاد می شود در فاز اول:

۱. نمونه برداری از ذخایر Ni-Cu سولفیدی

۲. آنالیز PGE (ICP-MS یا Fire Assay)

۳. بررسی کرومیت های لایه ای

۴. ارزیابی حضور Pd در کنسانتره های موجود

مسیر فرآوری پیشنهادی

پالادیوم معمولاً در مدار متالورژی Ni-Cu بازیابی می شود:

خردایش و فلوئاسیون برای تولید کنسانتره Ni-Cu-PGE
ذوب

پالایش الکترولیتی

جداسازی فلزات گروه پلاتین

تولید پالادیوم خالص

بازیابی PGE نیازمند فناوری پالایش پیشرفته (Refinery) است.

عیار معمول

در کانسنگ: 1 تا ۱۰ گرم بر تن PGE (g/t) حد اقتصادی وابسته به حضور Ni و Cu است.

هزینه تولید

به عنوان محصول جانبی: هزینه مستقیم تولید پایین است زیرا بخش عمده هزینه مربوط به Ni-Cu است. اما هزینه پالایش PGE معمولاً بالا و نیازمند فناوری پیچیده است.

قیمت جهانی

قیمت پالادیوم معمولاً در بازه: 900 تا ۱,۵۰۰ دلار به ازای هر اونس (نوسان شدید وابسته به بازار خودرو)

مزیت های بالقوه ایران

- ✓ وجود واحدهای فلوتاسیون Ni-Cu
- ✓ پتانسیل در کمرندهای اولترامافیک
- ✓ ارزش افزوده بسیار بالا حتی در ppm
- ✓ عدم نیاز به معدن مستقل در صورت وجود همراهی

برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول – شناسایی (۶ ماه)

- آنالیز PGE در ذخایر Ni-Cu
- تست آزمایشگاهی Fire Assay
- ارزیابی اقتصادی اولیه

فاز دوم – مطالعات فنی (۹ ماه)

- بررسی امکان احداث واحد پالایش PGE
- برآورد CAPEX پالایشگاه کوچک مقیاس
- تحلیل حساسیت قیمت

فاز سوم – توسعه صنعتی

- احداث واحد بازیابی PGM
- اتصال به زنجیره Ni-Cu کشور

پلاتین

مقدمه و اهمیت راهبردی

پلاتین یکی از عناصر گروه پلاتین (PGM) و فلزی فوق‌استراتژیک است. کاربردهای اصلی آن:

- کاتالیست خودروهای دیزلی
- صنایع پتروشیمی و پالایشگاه
- پیل‌های سوختی هیدروژنی
- تجهیزات آزمایشگاهی مقاوم به حرارت
- کاربردهای پزشکی و الکترونیک

تولید جهانی به شدت متمرکز است (بیش از ۷۰٪ در آفریقای جنوبی). این تمرکز، توسعه منابع جدید را از منظر امنیت تأمین، مهم می‌کند.

تیپ‌های کانساری اصلی پلاتین در جهان

کانسارهای لایه‌ای ماگمایی (Layered Intrusions)

مهم‌ترین منبع جهانی پلاتین.

نمونه کلاسیک: Bushveld Complex

ویژگی‌ها:

- همراه با Rh, Pd
- عیار ۲ تا ۱۰ گرم بر تن PGE
- تناژ بسیار بالا

کانسارهای سولفیدی Ni-Cu-PGE

نمونه: Norilsk

- همراه با نیکل و مس

- پلاتین به عنوان محصول جانبی

ذخایر کرومیتی با PGE

- در برخی افیولیت‌ها
- معمولاً عیار پایین

پلاسرهای PGM

- حاصل فرسایش ذخایر اولیه
- استخراج ساده‌تر

وضعیت بالقوه در ایران

با توجه به زمین‌شناسی ایران، پتانسیل پلاتین ممکن است در:

- ✓ کمربندهای افیولیتی
- ✓ توده‌های اولترامافیک
- ✓ ذخایر Ni-Cu سولفیدی
- ✓ برخی کرومیت‌ها

وجود داشته باشد. ایران فاقد کانسار لایه‌ای بزرگ مشابه Bushveld است، بنابراین تمرکز باید بر محصول جانبی در سیستم‌های Ni-Cu یا کرومیت باشد.

رویکرد پیشنهادی (فاز شناسایی)

در فاز اول پیشنهاد می‌شود:

۱. نمونه‌برداری از ذخایر Ni-Cu موجود
۲. آنالیز PGE با ICP-MS + Fire Assay
۳. بررسی کرومیت‌های لایه‌ای برای PGE

۴. آنالیز کنسانتره‌های موجود

تمرکز صرفاً بر شناسایی پتانسیل بدون اکتشاف مستقل پرریسک.

مسیر فرآوری پیشنهادی

پلاتین معمولاً در مدار متالورژی Ni-Cu بازیابی می‌شود:

- فلوتاسیون برای تولید کنسانتره سولفیدی
- ذوب
- پالایش الکتrolیتی
- جداسازی PGM
- تولید Pt اسفنجی یا شمش

بازیابی PGM نیازمند پالایشگاه تخصصی است.

پارامترهای اقتصادی جهانی

عیار معمول

در کانسنگ: 1 تا ۸ گرم بر تن Pt. اقتصادی بودن وابسته به حضور Ni و Cu است.

هزینه تولید

در اغلب پروژه‌ها، پلاتین محصول جانبی است؛ بنابراین هزینه استخراج مستقل تعریف نمی‌شود و وابسته به اقتصاد Ni-Cu است. هزینه پالایش PGM بالا و فناوری بر است.

قیمت جهانی

قیمت پلاتین معمولاً: 900 تا ۱,۲۰۰ دلار به ازای هر اونس (نوسان وابسته به صنعت خودرو و هیدروژن)

مزیت‌های بالقوه ایران

- ✓ وجود افیولیت‌های گسترده
- ✓ پتانسیل در ذخایر سولفیدی
- ✓ ارزش افزوده بالا حتی در g/t پایین
- ✓ امکان بازیابی جانبی بدون معدن مستقل

برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول – شناسایی (۶ ماه)

- آنالیز PGE در ذخایر هدف
- تست آزمایشگاهی Fire Assay
- ارزیابی اقتصادی اولیه

فاز دوم – ارزیابی فنی (۹ ماه)

- بررسی احداث واحد پالایش PGM
- مدل‌سازی اقتصادی
- تحلیل حساسیت قیمت

فاز سوم – اجرای صنعتی و توسعه زنجیره ارزش پلاتین

با توجه به اینکه پلاتین در ایران به احتمال زیاد به صورت محصول جانبی Ni-Cu یا کرومیت خواهد بود، اجرای صنعتی باید در قالب یکی از این دو مسیر تعریف شود:

سناریو A: بازیابی از کنسانتره Ni-Cu-PGE

مرحله ۱: تولید کنسانتره سولفیدی

- خردایش و فلو تاسیون
- تولید کنسانتره Ni-Cu حاوی PGE

مرحله ۲: ذوب و مات‌سازی

- احداث کوره ذوب یا استفاده از ظرفیت موجود

- تولید Matte حاوی فلزات پایه و PGE

مرحله ۳: پالایش الکترولیتی

- جداسازی Ni و Cu
- تمرکز PGE در لجن آندی

مرحله ۴: احداث واحد پالایش PGM

- لیچینگ انتخابی
- استخراج حلالی (SX)
- رسوبگیری و تولید Pt اسفنجی (99.95%)

سناریو B: فروش کنسانتره PGE در فاز اول صنعتی

در صورت پایین بودن تناژ:

- صادرات کنسانتره PGE برای پالایش خارجی
- جلوگیری از CAPEX سنگین پالایشگاه داخلی
- تمرکز بر ارزش افزوده معدنی

مقیاس پیشنهادی پالوت صنعتی

در صورت اثبات عیار $Pt\ 2-3\ g/t$:

- ظرفیت خوراک: ۵۰۰ هزار تن در سال
- تولید سالانه تقریبی: ۸۰۰ تا ۱,۲۰۰ کیلوگرم Pt
- درآمد بالقوه سالانه (با قیمت ۱,۰۰۰ دلار/اونس): حدود ۲۵ تا ۳۵ میلیون دلار

رودیوم

مقدمه و اهمیت راهبردی

رودیوم یکی از نادرترین و گران‌ترین عناصر گروه پلاتین (PGM) است. کاربردهای اصلی آن:

- کاتالیست خودروهای بنزینی کنترل (NOx)
- صنایع پتروشیمی
- آبکاری قطعات الکترونیکی
- کاربردهای دمای بالا

عرضه جهانی بسیار محدود و متمرکز است (عمدتاً آفریقای جنوبی). به دلیل تولید پایین جهانی، نوسان قیمت بسیار شدید است.

تیپ‌های کانساری رودیوم در جهان

رودیوم تقریباً هرگز ذخیره مستقل ندارد و همراه سایر PGM استخراج می‌شود.

کانسارهای لایه‌ای ماگمایی

مهم‌ترین منبع جهانی: Bushveld Complex

- همراه با Pt و Pd
- تمرکز در لایه‌های خاص (Merensky Reef)

کانسارهای Ni-Cu-PGE سولفیدی

نمونه: Norilsk

- رودیوم به‌صورت محصول جانبی همراه Ni و Cu

پلاسره‌های PGM

در برخی پلاسرها Rh به‌صورت جزئی دیده می‌شود.

وضعیت بالقوه در ایران

با توجه به نبود توده لایه‌ای عظیم PGM در ایران، پتانسیل احتمالی رودیوم محدود به:

- ✓ ذخایر Ni-Cu سولفیدی
- ✓ برخی افیولیت‌ها و کرومیت‌های خاص
- ✓ حضور همراه Pd و Pt

خواهد بود. رودیوم در حد ppm بسیار پایین حضور دارد و بدون وجود Pt/Pd اقتصادی نیست.

رویکرد پیشنهادی (فاز شناسایی)

در فاز اول پیشنهاد می‌شود:

- آنالیز کامل PGE (Pt, Pd, Rh, Ir, Ru)
- استفاده از Fire Assay + ICP-MS
- بررسی کنسانتره‌های Ni-Cu موجود
- تحلیل اقتصادی مبتنی بر مجموعه PGM

مسیر فرآوری پیشنهادی

رودیوم در مراحل پالایش PGM جدا می‌شود:

فلوتاسیون برای تولید کنسانتره سولفیدی

ذوب Matte

پالایش الکترولیتی

تمرکز PGM در لجن آندی

جداسازی شیمیایی Rh در پالایشگاه تخصصی (فرآیند جداسازی Rh پیچیده و سرمایه‌بر است).

عیار معمول

در کانسنگ: 0.05 تا ۰.۵ گرم بر تن (اغلب بسیار کمتر از Pt و Pd).

قیمت جهانی

رودیوم یکی از پرنوسان‌ترین فلزات جهان است و در سال‌های اخیر بین 5,000 تا بیش از ۲۰,۰۰۰ دلار به ازای هر اونس در نوسان بوده است.

حتی تولید چند ده کیلوگرم Rh در سال می‌تواند درآمد بسیار قابل توجه ایجاد کند، اما فقط در صورت وجود زنجیره کامل PGM اقتصادی است.

برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول – شناسایی (۶ ماه)

- آنالیز جامع PGE
- بررسی ذخایر سولفیدی هدف

فاز دوم – پایلوت (۹ ماه)

- تست تمرکز PGM
- بررسی تمرکز Rh در لجن آندی

فاز سوم – اجرا (در صورت اثبات اقتصادی بودن)

- اتصال به پالایشگاه PGM
- بازیابی Rh به عنوان محصول جانبی
- عدم احداث واحد مستقل

عناصر نادر خاکی (Rare Earth Elements)

مقدمه و اهمیت راهبردی عناصر نادر خاکی (REE)

عناصر نادر خاکی (Rare Earth Elements) شامل ۱۷ عنصر (لانتانیدها به همراه Sc و Y) هستند که نقش حیاتی در صنایع پیشرفته دارند. این عناصر به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند:

- LREE (سبک): La, Ce, Pr, Nd
- HREE (سنگین): Dy, Tb, Er, Yb, Y

کاربردهای اصلی

- مگنت‌های دائم Nd-Fe-B (خودروهای برقی و توربین‌های بادی)
- صنایع دفاعی و اپتوالکترونیک
- باتری‌ها و ذخیره انرژی
- کاتالیست‌های پالایشگاهی
- صنایع شیشه و سرامیک پیشرفته

اهمیت راهبردی

بازار جهانی REE به شدت تحت تأثیر تولید متمرکز در چین است (بیش از ۶۰-۷۰٪ تولید جهانی و سهم بالاتر در فرآوری). این تمرکز، ریسک ژئوپلیتیکی و نوسان عرضه ایجاد کرده است. عناصر سنگین (HREE) از نظر راهبردی حساس‌تر و کمیاب‌ترند.

تیپ‌های کانساری عناصر نادر خاکی در جهان

- کانسارهای کربناتیتی

مهم‌ترین منبع جهانی REE

نمونه شاخص: Bayan Obo

• غنی از LREE

• همراه با Fe و Nb

• بزرگ‌ترین ذخیره شناخته‌شده REE جهان

کانسارهای آذرین آلکالن و پگماتیتی

نمونه: Mount Weld

•عیار بالا

•تمرکز روی Nd و Pr

رس‌های جذب یونی (Ion-Adsorption Clays)

جنوب چین

•منبع اصلی HREE

•استخراج نسبتاً ساده (لیچینگ سطحی)

•اهمیت راهبردی بسیار بالا

پلاسره‌های مونازیتی

نمونه: Kerala Monazite Sands

•همراه با Th

•نیازمند مدیریت رادیواکتیویته

وضعیت بالقوه در ایران

با توجه به زمین‌شناسی ایران، پتانسیل REE محدود به موارد زیر است:

✓توده‌های آلکالن و کربناتیتی (مرکزی و شرق ایران)

✓برخی نواحی آتشفشانی آلکالن

✓مونازیت در ماسه‌های سنگین

✓همراهی با کانسارهای فسفات و آهن

نکته کلیدی: اقتصادی بودن پروژه REE وابسته به درصد Nd+Pr و همچنین وجود عناصر سنگین (Dy, Tb) است. صرف حضور Ce یا La معمولاً مزیت اقتصادی ایجاد نمی‌کند.

رویکرد پیشنهادی (فاز شناسایی)

در فاز اول پیشنهاد می‌شود:

- آنالیز کامل REE (La تا Lu + Y + Sc)
- استفاده از ICP-MS با هضم کامل اسیدی
- تعیین الگوی توزیع REE (نرمال سازی کندریت)
- بررسی عناصر همراه (Th, U, Nb, P)
- تست مینرالوژی (QEMSCAN / MLA) برای شناسایی فازهای موناژیت، باستناسیت، زنون تيم
- تمرکز اصلی: تعیین نسبت Nd+Pr و HREE/LREE

مسیر فرآوری پیشنهادی

فرآوری REE پیچیده و سرمایه بر است و بخش جداسازی شیمیایی ارزش اصلی را ایجاد می کند.

مراحل عمومی:

- (۱) خردایش و پرعیار سازی فیزیکی (جدایش ثقلی / مغناطیسی / فلوتاسیون)
 - (۲) تولید کنسانتره REE
 - (۳) لیچینگ اسیدی یا قلیایی (HCl / H₂SO₄ / NaOH بسته به کانی شناسی)
 - (۴) استخراج حلالی (Solvent Extraction) برای جداسازی مرحله ای REE ها از یکدیگر
 - (۵) تولید اکسیدهای جداگانه (Nd₂O₃, Pr₆O₁₁, Dy₂O₃)
- احداث واحد جداسازی کامل REE نیازمند سرمایه گذاری بسیار بالا و دانش فنی تخصصی است.

عیار معمول

- کانسنگ سخت: ۰.۵ تا ۵ درصد TREO
- رس های جذب یونی: ۰.۰۵ تا ۰.۳ درصد
- حد اقتصادی وابسته به توزیع عناصر است، نه فقط عیار کل

قیمت جهانی

قیمت REE ها متفاوت است:

- Nd و Pr (کلیدی برای مگنت‌ها): ارزش بالا
- Dy و Tb: بسیار گران و راهبردی
- Ce و La: قیمت پایین‌تر

بازار REE پرنوسان و وابسته به سیاست‌های صادراتی چین است.

برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول – شناسایی (۶ ماه)

- نمونه‌برداری سیستماتیک
- آنالیز کامل REE
- تعیین مینرالوژی
- برآورد اولیه Nd+Pr

فاز دوم – پایلوت (۹ ماه)

- تست‌های پری‌عیارسازی
- تست لیچینگ
- ارزیابی استخراج حلالی آزمایشگاهی
- مدل اقتصادی اولیه

فاز سوم – اجرا (در صورت اثبات اقتصادی بودن)

- تولید کنسانتره REE در داخل
- ارسال کنسانتره به پالایشگاه تخصصی خارجی (در صورت نبود فناوری داخلی)
- عدم احداث واحد جداسازی کامل در فاز نخست
- تمرکز بر عناصر با ارزش بالا (Nd, Pr, Dy)

کبالت

مقدمه و ضرورت طرح

کبالت یکی از فلزات استراتژیک مورد استفاده در تولید باتری‌های لیتیوم-یون، سوپرآلیاژها، کاتالیست‌ها و صنایع پیشرفته است. با رشد صنایع انرژی نو، اهمیت کبالت در زنجیره تأمین جهانی افزایش یافته است.

مطابق مطالعات زمین‌شناسی بین‌المللی، کبالت در اغلب موارد به‌صورت ذخیره مستقل تشکیل نمی‌شود، بلکه عمدتاً به‌عنوان محصول جانبی استخراج از ذخایر مس و نیکل تولید می‌گردد. بنابراین، توسعه کبالت در ایران نیز باید مبتنی بر بهره‌برداری از ذخایر موجود فلزات پایه باشد.

با توجه به نبود ذخایر شناخته‌شده مستقل کبالت در کشور، رویکرد این پیشنهاد بر شناسایی و استحصال کبالت از ذخایر مس-نیکل و VMS موجود استوار است.

رویکرد زمین‌شناسی و شناسایی پتانسیل‌ها

بر اساس مطالعات جهانی، تیپ‌های زیر بیشترین پتانسیل کبالت را دارند:

الف) ذخایر Cu-Ni ماگمایی (اولترامافیک میزبان)

- حضور پنتلاندیت
- همراهی پیروتیت و کالکوپیریت
- محیط مافیک یا اولترامافیک

در این تیپ، کبالت معمولاً جانشین نیکل در ساختار پنتلاندیت می‌شود و می‌تواند به‌عنوان محصول جانبی اقتصادی استخراج شود.

ب) ذخایر VMS مافیک

- سولفیدهای آهن بالا (پیریت و پیروتیت)
- محیط آتشفشانی زیر دریایی

در این ذخایر، کبالت معمولاً در پیریت و پیروتیت تمرکز می‌یابد.

ج) ذخایر رسوبی مس (در صورت وجود مشابه Copperbelt)

در صورت شناسایی پاراژنز مشابه، بررسی پتانسیل Co ضروری است.

دامنه مطالعات پیشنهادی (در حد شناسایی)

- جمع‌آوری داده‌های ژئوشیمیایی موجود
- بازآنالیز نمونه‌های بایگانی‌شده معادن Cu و Ni
- انجام آنالیز ICP-MS برای عناصر Co در محدوده‌های منتخب
- مطالعه مینرالوژی جهت تعیین نحوه حضور Co (جانشینی یا فاز مستقل)

سناریوی فرآوری پیشنهادی

با توجه به ماهیت همراه کبالت، فرآوری آن به دو صورت قابل انجام است:

۱- استحصال از کنسانتره Cu-Ni

- خردایش و فلوئاسیون

- تولید کنسانتره مشترک Cu-Ni-Co

- لیچینگ اسیدی کنسانتره

- حذف اولیه آهن و عناصر مزاحم (رسوبدهی کنترل شده)

- جداسازی انتخابی Ni و Co با استخراج حلالی (SX)

- تولید کبالت سولفات یا هیدروکسید کبالت (MHP)

۲- استحصال از باطله‌ها یا پسماندهای کارخانه‌های مس

در صورت وجود Co در پسماندها:

- لیچینگ انتخابی
- تغلیظ محلول
- استخراج انتخابی
- تولید محصول میانی کبالت

این مسیر می‌تواند سرمایه‌گذاری اولیه کمتری نیاز داشته باشد.

تحلیل اقتصادی مبتنی بر By-product

از آنجا که کبالت در این طرح محصول جانبی است، اقتصاد آن متفاوت از یک معدن مستقل خواهد بود.

۱- هزینه تولید

در پروژه‌های جهانی: هزینه تولید کبالت به عنوان محصول جانبی از ذخایر Cu-Ni: حدود 7,000 تا ۱۲,۰۰۰ دلار به ازای هر تن کبالت است.

۲- قیمت جهانی

قیمت جهانی کبالت طی سال‌های اخیر بین 30,000 تا ۵۰,۰۰۰ دلار به ازای هر تن در نوسان بوده است. بنابراین حتی با فرض هزینه ۱۲,۰۰۰ دلار حاشیه سود بالقوه قابل توجهی وجود دارد.

- مزایای اجرای طرح

- استفاده از زیرساخت‌های موجود معادن مس و نیکل
- عدم نیاز به سرمایه‌گذاری سنگین اکتشاف مستقل
- افزایش درآمد واحدهای مس و نیکل
- توسعه فناوری هیدرومتالورژی پیشرفته
- ورود ایران به زنجیره فلزات باتری‌محور

- برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول (۶ ماه)

- غربالگری زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی
- نمونه‌برداری هدفمند
- تست لیچینگ آزمایشگاهی

فاز دوم (۹-۱۲ ماه)

- طراحی پایلوت جداسازی Ni-Co
- تعیین بازیابی واقعی
- تحلیل CAPEX و OPEX

فاز سوم

- طراحی مهندسی واحد صنعتی
- اجرا و بهره‌برداری

نیکل

مقدمه و ضرورت طرح

نیکل یکی از فلزات استراتژیک مورد استفاده در تولید فولادهای زنگ‌نزن، سوپراآلیاژها، صنایع نفت و گاز و به‌ویژه باتری‌های خودروهای برقی است. رشد سریع تقاضای جهانی در حوزه انرژی‌های نو، جایگاه این فلز را به‌عنوان یک ماده اولیه راهبردی تثبیت کرده است.

در حال حاضر کشور فاقد زنجیره صنعتی تولید نیکل بوده و نیاز داخلی از طریق واردات تأمین می‌شود. با توجه به وجود شواهدی از کانی‌سازی‌های نیکل‌دار در کمربندهای اولترامافیک کشور، ایجاد ظرفیت فرآوری و تولید نیکل می‌تواند گام مهمی در توسعه فلزات استراتژیک و کاهش وابستگی ارزی باشد.

هدف طرح

ایجاد ظرفیت صنعتی برای تولید:

- کنسانتره نیکل
- شمش یا کاتد نیکل با خلوص بالا
- یا محصولات میانی نظیر نیکل سولفات

شناسایی پتانسیل‌های معدنی (در حد مطالعات پایه)

در این پیشنهاد، بخش اکتشاف صرفاً در حد شناسایی پتانسیل‌های موجود تعریف می‌گردد و شامل موارد زیر خواهد بود:

- گردآوری و تحلیل داده‌های زمین‌شناسی موجود
- بررسی گزارش‌های اکتشافی پیشین
- اولویت‌بندی محدوده‌های دارای پتانسیل نیکل
- انجام نمونه‌برداری محدود جهت تأیید عیار و تیپ کانسنگ

این مرحله با هدف تصمیم‌سازی برای ورود به فاز فرآوری انجام می‌شود و شامل عملیات حفاری گسترده نخواهد بود.

سناریوهای فنی فرآوری

با توجه به تیپ کانسنگ (سولفیدی یا لاتریتی)، دو مسیر فنی قابل بررسی است:

الف) کانسنگ‌های سولفیدی

- خردایش و آسیاکنی
 - فلوئاسیون انتخابی
 - تولید کنسانتره نیکل با عیار ۸ تا ۱۵ درصد
- سپس:
- لیچینگ کنسانتره
 - خالص‌سازی محلول
 - استخراج حلالی (SX)
 - الکترووینینگ (EW)
 - تولید کاتد نیکل با خلوص بیش از ۹۹.۸ درصد

ب) کانسنگ‌های لاتریتی

- پیش‌عمل‌آوری و خردایش
- لیچینگ تحت فشار (HPAL) یا روش پیرومتالورژی
- تولید محلول باردار نیکل
- خالص‌سازی و تولید فلز یا نیکل سولفات

با توجه به شدت مصرف انرژی در روش پیرومتالورژی، پیشنهاد می‌شود تمرکز اصلی بر مسیر هیدرومتالورژی باشد.

برآورد هزینه‌های فرآوری بر اساس عرف جهانی^۱

۱- هزینه تولید کنسانتره نیکل (از کانسنگ سولفیدی)

هزینه عملیاتی (OPEX) شامل:

- خردایش و آسیاکنی
- مواد شیمیایی فلوئاسیون

^۱ ارقام بر اساس داده‌های جهانی پروژه‌های فعال در بازه ۲۰۲۳-۲۰۲۵ و میانگین هزینه‌های عملیاتی ارائه می‌گردد.

- انرژی
- نیروی انسانی
- نگهداری و تعمیرات

متوسط هزینه جهانی فرآوری: حدود 10 تا ۱۵ دلار به ازای هر تن کانسنگ خوراک

با فرض عیار ۱٪ نیکل و بازیابی ۷۵٪: هزینه تولید هر تن کنسانتره نیکل حدود 3,000 تا ۵,۰۰۰ دلار به ازای هر تن نیکل موجود در کنسانتره است.

۲- هزینه تولید شمش یا کاتد نیکل

در مسیر هیدرومتالورژی (SX + EW + لیچینگ): هزینه تبدیل کنسانتره به فلز: حدود 4,000 تا ۷,۰۰۰ دلار به ازای هر تن نیکل فلزی

در پروژه‌های لاتریتی (HPAL): هزینه تولید کامل فلز نیکل معمولاً بین 8,000 تا ۱۲,۰۰۰ دلار به ازای هر تن نیکل فلزی (بسته به عیار، مصرف اسید، انرژی و مقیاس پروژه)

قیمت جهانی نیکل در سال‌های اخیر عمدتاً در بازه: 16,000 تا ۲۲,۰۰۰ دلار به ازای هر تن

در نتیجه، در صورت مدیریت مناسب هزینه سرمایه‌گذاری و انتخاب صحیح تکنولوژی، پروژه از منظر اقتصادی قابل توجیه خواهد بود.

پیشنهاد اجرایی

پیشنهاد می‌شود پروژه در سه گام اجرایی تعریف گردد:

گام اول: مطالعات پتانسیل و تست‌های آزمایشگاهی (۶ ماه)

گام دوم: طراحی و احداث پایلوت فرآوری (۹ تا ۱۲ ماه)

گام سوم: طراحی و اجرای واحد صنعتی