

اکسید تیتانیوم

مقدمه و اهمیت راهبردی اکسیدهای تیتانیوم (TiO₂)

اکسید تیتانیوم یکی از مهم‌ترین مواد معدنی صنعتی جهان است که عمدتاً به صورت TiO₂ 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 TiO₂ 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 پلاسرها 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 تعیین کننده 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 کانی شناسی (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)
- فلوتاسیون 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 الکتروکاتالیست‌های 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 (Pt, Pd, Rh, Ir, Ru) PGE
- 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 پیچیده‌ترین 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 سال‌های اخیر بین ۱۰۰,۰۰۰ تا ۲۰۰,۰۰۰ دلار به ازای هر کیلوگرم در نوسان بوده است. حتی چند ده کیلوگرم تولید سالانه می‌تواند 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

بروم

مقدمه و اهمیت راهبردی بروم (Br)

بروم یکی از عناصر هالوژن با کاربردهای گسترده صنعتی است که عمدتاً از شوره‌های زیرزمینی و دریاچه‌های شور استخراج می‌شود. این عنصر به صورت ترکیبات برومیدی در محلول حضور دارد و به ندرت به صورت کانی مستقل دیده می‌شود.

کاربردهای اصلی:

- تولید مواد بازدارنده شعله (Flame Retardants)
- سیالات حفاری در صنعت نفت و گاز
- صنایع دارویی و شیمیایی
- ضد عفونی کننده‌های آب
- کاربرد در تولید برخی پلیمرهای مهندسی

اهمیت راهبردی:

بازار جهانی بروم نسبتاً متمرکز است و تولید آن عمدتاً در آمریکا، اسرائیل و چین انجام می‌شود. وابستگی صنایع نفت، گاز و پلیمر به این عنصر، اهمیت راهبردی آن را افزایش داده است.

تیپ‌های منابع بروم در جهان

- شوره‌های زیرزمینی عمیق (مهم‌ترین منبع جهانی بروم)
نمونه شاخص: Smackover Formation
غلظت بالای یون Br^-
استخراج اقتصادی در مقیاس صنعتی
- دریاچه‌های شور
نمونه: Dead Sea
غلظت بسیار بالای املاح
تولید همزمان پتاس و منیزیم

- شورابه‌های میادین نفت و گاز
بازیابی به‌عنوان محصول جانبی
وابسته به ترکیب شیمیایی آب سازند

وضعیت بالقوه در ایران

پتانسیل بروم در ایران عمدتاً در:

- شورابه‌های دریاچه‌های نمکی مرکزی
 - شورابه‌های استحصال ید
 - شورابه‌های همراه میادین نفت و گاز
 - برخی پلایاهای کویری
- غلظت اقتصادی معمولاً بالاتر از ۲۰۰-۳۰۰ ppm بروم در شورابه است. ارزیابی دقیق ژئوشیمیایی ضروری است.

رویکرد پیشنهادی (فاز شناسایی)

در فاز اول پیشنهاد می‌شود:

- نمونه‌برداری سیستماتیک از شورابه‌ها
- آنالیز کامل Ca, Na, Mg, Cl, Br
- تعیین نسبت Br/Cl
- بررسی دبی و پایداری منبع
- ارزیابی ترکیبات مزاحم (SO_4^{2-} ، مواد آلی)

تمرکز اصلی: تعیین حجم ذخیره شورابه و قابلیت بهره‌برداری پیوسته

مسیر فرآوری پیشنهادی

فرآیند صنعتی تولید بروم معمولاً شامل:

- اکسیداسیون یون Br^- با کلر (Cl_2) و تبدیل به Br_2 آزاد
- هوادهی و جداسازی بخار بروم

- تقطیر و خالص‌سازی
- تولید مشتقات (HBr, NaBr, CaBr₂)

ویژگی مهم: واحد تولید بروم نسبت به فلزات سرمایه‌گذاری پایین‌تری دارد اما وابسته به دسترسی پایدار به شوره با غلظت مناسب است که این امکان در شوره‌های استان گلستان وجود دارد.

عیار معمول

- شوره‌های اقتصادی: ۲۰۰ تا ۵۰۰۰ ppm Br
- دریاچه‌های بسیار غنی: بالاتر از ۵۰۰۰ ppm

اقتصادی بودن پروژه تابع همزمان غلظت و دبی تولیدی است.

قیمت جهانی

قیمت بروم نسبت به فلزات نوسان کمتری دارد اما وابسته به تقاضای صنایع پلیمر و حفاری است. مشتقات بروم ارزش افزوده بالاتری نسبت به بروم خام دارند.

هزینه تولید بروم

هزینه تولید وابسته به غلظت شوره، هزینه کلر، انرژی و مقیاس واحد است. به‌طور تقریبی:

- هزینه عملیاتی (OPEX): حدود ۱,۲۰۰ تا ۲,۵۰۰ دلار به ازای هر تن Br₂
- در منابع بسیار غنی (بیش از ۳۰۰۰ ppm): امکان کاهش هزینه تا حدود ۱,۰۰۰ دلار در هر تن
- سهم مواد شیمیایی (کلر) و انرژی: ۴۰ تا ۶۰ درصد هزینه عملیاتی

CAPEX تقریبی:

- تجهیزات فرآیندی (راکتور کلرزی، برج هوادهی، کندانسور، ستون تقطیر): ۱,۵ تا ۳ میلیون دلار
 - مخازن، سیستم کلر، ایمنی و کنترل: ۰,۵ تا ۱,۵ میلیون دلار
 - ساختمان و زیرساخت: ۰,۵ تا ۱ میلیون دلار
 - مهندسی، نصب و راه‌اندازی: ۲۰ تا ۳۰ درصد تجهیزات
- جمع کل تقریبی: ۳ تا ۶ میلیون دلار

نکته مهم: تولید مشتقات مانند CaBr_2 و HBr می‌تواند حاشیه سود را ۲۰ تا ۴۰ درصد افزایش دهد.

برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول – شناسایی (۶ ماه)

- آنالیز ژئوشیمیایی شورابه‌ها
- تست نیمه‌صنعتی استخراج
- برآورد ذخیره دینامیک

فاز دوم – پایلوت (۶ تا ۹ ماه)

- احداث واحد آزمایشی اکسیداسیون
- ارزیابی مصرف کلر و انرژی
- تحلیل اقتصادی اولیه

فاز سوم – اجرا

- احداث واحد تولید بروم
- توسعه تولید مشتقات با ارزش افزوده
- یکپارچه‌سازی با صنایع نفت و گاز

بور

مقدمه و اهمیت راهبردی بور (B)

بور یک عنصر استراتژیک با کاربردهای گسترده در صنایع شیشه، سرامیک، شوینده‌ها، کشاورزی و مواد پیشرفته است. این عنصر عمدتاً به صورت کانی‌های بوراته استخراج می‌شود و به ندرت به صورت عنصری مصرف دارد.

کاربردهای اصلی:

- شیشه‌های بوروسیلیکاتی مقاوم به حرارت
- فایبرگلاس و عایق‌های صنعتی
- کودهای کشاورزی (ریزمغذی)
- مواد شوینده (پربورات‌ها)
- صنایع هسته‌ای (جذب نوترون)
- آلیاژهای ویژه و مواد سرامیکی پیشرفته

اهمیت راهبردی: تولید جهانی بور به شدت متمرکز است و بخش عمده ذخایر دنیا در ترکیه قرار دارد. پس از آن آمریکا از تولیدکنندگان مهم است. این تمرکز، اهمیت ژئواقتصادی بور را افزایش داده است.

تیپ‌های کانساری بور در جهان

- کانسارهای تبخیری (Evaporitic) مهم‌ترین منبع جهانی بور
نمونه شاخص: Kırka Bor Mine
- غنی از تینکال (Borax)
- استخراج روباز کم‌هزینه
- کانسارهای کولمانیتی
- مناسب تولید اسید بوریک
- عیار بالای B_2O_3
- شورابه‌های دریاچه‌ای و ژئوترمال
- غلظت پایین‌تر
- امکان بازیابی به‌عنوان محصول جانبی

وضعیت بالقوه در ایران

پتانسیل بور در ایران محدود ولی قابل بررسی است:

- رسوبات تبخیری مناطق کویری
- همراهی با شورابه‌های دریاچه‌های نمکی
- برخی نشانه‌های بوراته در کمربندهای آتشفشانی

نکته کلیدی: عیار اقتصادی معمولاً بالاتر از ۲۰٪ B_2O_3 در ماده معدنی جامد است.

رویکرد پیشنهادی (فاز شناسایی)

- نمونه‌برداری سیستماتیک از تبخیری‌ها
- آنالیز B_2O_3 ، CaO ، Na_2O ، MgO
- تعیین نوع کانی (تینکال، کولمانیت، اولکسیت)
- بررسی ناخالصی‌های سولفات و کلرید
- ارزیابی حجم ذخیره و شرایط استخراج روباز

تمرکز اصلی: امکان تولید مستقیم بوراکس یا اسید بوریک

مسیر فرآوری پیشنهادی

بسته به نوع کانی:

- خردایش و شستشو
- انحلال در آب گرم (برای تینکال)
- تبلور مجدد و تولید Borax Decahydrate

یا تولید اسید بوریک از واکنش با اسید سولفوریک

ویژگی مهم: فرآوری بور نسبت به بسیاری از فلزات پیچیدگی پایین‌تری دارد و سرمایه‌گذاری متوسط نیاز دارد.

عیار معمول

- کانسنگ بوراته: ۲۰ تا ۴۰ درصد B_2O_3
- کنسانتره قابل فروش: بالاتر از ۳۰ درصد B_2O_3

هزینه تولید (برآورد تقریبی)

برای واحد کوچک تا متوسط (۵۰ تا ۱۵۰ هزار تن محصول بوراکس یا اسید بوریک در سال):

CAPEX تقریبی: ۲۰ تا ۵۰ میلیون دلار (بسته به ظرفیت و سطح اتوماسیون)

OPEX تقریبی: ۱۵۰ تا ۳۰۰ دلار به ازای هر تن محصول (وابسته به هزینه انرژی و اسید)

مزیت مهم: مصرف انرژی نسبتاً پایین و فرآیند ساده‌تر نسبت به فلزات استراتژیک.

ریسک‌های کلیدی

- رقابت شدید با تولیدکنندگان بزرگ به ویژه Turkey
- حساسیت قیمت به بازار شیشه و ساختمان
- محدود بودن بازار داخلی در صورت نبود صنایع پایین دستی

برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول - شناسایی (۶ ماه)

- آنالیز کانی شناسی
- تست انحلال آزمایشگاهی
- برآورد ذخیره مقدماتی

فاز دوم - پایلوت (۶ تا ۹ ماه)

- تولید آزمایشی بوراکس یا اسید بوریک
- تحلیل بازار داخلی و صادرات

فاز سوم - اجرا

- احداث کارخانه فرآوری
- توسعه محصولات با ارزش افزوده (کودهای بوراته، بوریک اسید صنعتی)
- بررسی زنجیره پیشرفته (بور کاربرد در فاز توسعه)

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 به‌عنوان 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 فلوتاسیون 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: ۱ 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: ۹۰۰ تا ۱،۵۰۰ دلار به ازای هر اونس (نوسان شدید وابسته به بازار خودرو)

مزیت‌های بالقوه ایران

- ✓ وجود واحدهای فلوتاسیون Ni-Cu
- ✓ پتانسیل در کمربندهای 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 Fire Assay + ICP-MS
۳. بررسی کرومیت‌های لایه‌ای برای PGE
۴. آنالیز کنسانتره‌های موجود

تمرکز صرفاً بر شناسایی پتانسیل بدون اکتشاف مستقل پیریکسک.

مسیر فرآوری پیشنهادی

پلاتین معمولاً در مدار متالورژی Ni-Cu بازیابی می‌شود:

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

بازیابی PGM نیازمند پالایشگاه تخصصی است.

پارامترهای اقتصادی جهانی

عیار معمول

در کانسنگ: ۱ 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: ۹۰۰ 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 فلوتاسیون
- 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 (۹۹,۹۵٪)

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 پایلوت صنعتی

در صورت اثبات عیار Pt ۲-۳ 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

تری اکسید کروم

مقدمه و اهمیت راهبردی تری اکسید کروم (CrO_3)

تری اکسید کروم با فرمول CrO_3 ترکیب اصلی کروم شش ظرفیتی است و ماده پایه در آبکاری کروم سخت و تزئینی محسوب می شود. این ماده اکسیدکننده قوی بوده و در صنایع فلزی و شیمیایی کاربرد گسترده دارد.

کاربردهای اصلی:

- آبکاری کروم سخت (Hard Chrome Plating)
- آبکاری تزئینی قطعات خودرو و لوازم خانگی
- تولید اسید کرومیک (Chromic Acid)
- صنایع رنگدانه و برخی اکسیدکننده های شیمیایی
- آنودایز آلومینیوم (برخی کاربردهای خاص)

اهمیت راهبردی: مصرف CrO_3 وابسته به صنعت خودرو، قالب سازی و تجهیزات صنعتی است. به دلیل محدودیت های زیست محیطی مرتبط با Cr^{6+} ، تولید و مصرف آن در بسیاری از کشورها تحت مقررات سختگیرانه قرار دارد (به ویژه در European Union).

زنجیره تأمین و تیپ منابع کروم

ماده اولیه تولید CrO_3 ، سنگ کرومیت (FeCr_2O_4) است. تولید جهانی کرومیت متمرکز در:

• بزرگ‌ترین تولیدکننده جهان آفریقای جنوبی است.

• قزاقستان

• هند

• ترکیه

کرومیت پس از فرآوری شیمیایی به سدیم دی کرومات و سپس به تری اکسید کروم تبدیل می‌شود.

وضعیت بالقوه در ایران

ایران دارای ذخایر کرومیت (عمدتاً در کمربند افیولیتی) است. بنابراین از نظر ماده اولیه مزیت نسبی وجود دارد.

چالش‌های اصلی:

- نیاز به واحد شیمیایی پیشرفته

- مدیریت پسماندهای حاوی Cr^{6+}

- رعایت الزامات زیست‌محیطی سختگیرانه

مزیت بالقوه: توسعه زنجیره ارزش به‌جای خام‌فروشی کرومیت

رویکرد پیشنهادی (فاز شناسایی)

• بررسی عیار Cr_2O_3 در کرومیت (بیش از ۴۰٪ مطلوب)

• آنالیز عناصر مزاحم (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO)

• بررسی بازار داخلی آبکاری

• ارزیابی هزینه مدیریت زیست‌محیطی

• تحلیل مقررات ایمنی و صادرات

تمرکز اصلی: امکان تولید سدیم دی کرومات با راندمان بالا

مسیر فرآوری پیشنهادی

• خردایش و تغلیظ کرومیت

• تشویه اکسیداسیونی با سود سوزآور و آهک برای تولید سدیم کرومات (Na_2CrO_4)

• اسیدی‌سازی

تبدیل به سدیم دی کرومات ($Na_2Cr_2O_7$)

- اسیدشویی و تبلور
تولید CrO_3 با خلوص بالا

ویژگی کلیدی: فرآیند شیمیایی انرژی بر و نیازمند کنترل دقیق پساب‌های سمی است.

عیار و مشخصات محصول

- خلوص صنعتی: بالاتر از ۹۹ درصد
- ناخالصی‌های فلزی بسیار پایین
- کنترل دقیق یون‌های کلر و سولفات

هزینه تولید (برآورد اولیه)

برای واحد کوچک تا متوسط (۵,۰۰۰ تا ۱۰,۰۰۰ تن در سال CrO_3):

CAPEX تقریبی:

۱۵ تا ۳۰ میلیون دلار (وابسته به سیستم تصفیه پساب و کنترل آلودگی)

OPEX تقریبی:

۱,۲۰۰ تا ۲,۰۰۰ دلار به ازای هر تن محصول (وابسته به قیمت کرومیت و انرژی)

نکته مهم: سیستم‌های تصفیه پساب و بازیافت کروم می‌تواند ۲۰ تا ۳۰ درصد سرمایه‌گذاری را تشکیل دهد.

ریسک‌های کلیدی

- محدودیت‌های زیست‌محیطی مرتبط با Cr^{6+}
- جایگزینی تدریجی آبکاری کروم سخت با فناوری‌های HVOF و پوشش‌های نوین
- حساسیت بازار صادراتی

برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول - مطالعه امکان‌سنجی (۶ ماه)

- تحلیل بازار داخلی

- تست پایلوت تولید سدیم دی کرومات
- برآورد هزینه تصفیه پساب

فاز دوم – طراحی پایه (۶ تا ۹ ماه)

- طراحی مدار شیمیایی
- طراحی واحد خنثی سازی و بازیافت

فاز سوم – اجرا

- احداث واحد تولید
- اخذ مجوزهای زیست محیطی
- توسعه بازار داخلی آبکاری

تنگستن

مقدمه و ضرورت طرح

تنگستن یکی از فلزات استراتژیک با بالاترین نقطه ذوب در میان فلزات است و در صنایع زیر کاربرد دارد:

- ابزارهای برشی و کاربردی (WC)
- صنایع نفت و گاز (مته‌های حفاری)
- آلیاژهای مقاوم به حرارت
- صنایع دفاعی و هوافضا
- تجهیزات الکترونیکی خاص

بیش از ۸۰٪ تولید جهانی تنگستن در چین انجام می‌شود، لذا توسعه منابع داخلی آن دارای اهمیت راهبردی بالاست.

تیپ‌های کانساری تنگستن در جهان

۱- ذخایر رگه‌ای کوارتز-ولفرامیت

- مرتبط با توده‌های گرانیتی
- ساختارهای رگه‌ای و استوک‌ورک
- کانی اصلی Wolframite

۲- ذخایر اسکارنی (Scheelite-bearing Skarn)

- تماس توده گرانیتی با سنگ‌های کربناته
- کانی اصلی Scheelite
- عیار بالاتر نسبت به ذخایر رگه‌ای

۳-۲ ذخایر پورفیری W-Mo

- همراهی مولیبدن
- عیار پایین ولی تناژ بالا

وضعیت زمین‌شناسی بالقوه در ایران

با توجه به فراوانی توده‌های گرانیتی و محیط‌های اسکارنی در کمربندهای ماگمایی ایران، پتانسیل تنگستن عمدتاً در:

- سیستم‌های اسکارنی وابسته به گرانیت
- رگه‌های کوارتز-ولفرامیت
- مناطق پورفیری W-Mo

قابل بررسی است. در برخی مناطق ایران سابقه معدنکاری کوچک مقیاس تنگستن وجود داشته که نیازمند بازاریابی ژئوشیمیایی و اقتصادی است.

رویکرد پیشنهادی (در حد شناسایی پتانسیل)

با توجه به ریسک اکتشاف فلزات نادر، پیشنهاد می‌شود فاز اول صرفاً شامل:

- گردآوری اطلاعات معادن قدیمی

- بازنمونه برداری از مناطق گرانیتی-اسکارنی
- آنالیز W با روش ICP-MS
- بررسی UV برای شناسایی Scheelite
- مطالعات کانی شناسی جهت تعیین آزادسازی

سناریوی فرآوری پیشنهادی

در صورت غالب بودن Scheelite

خردایش و آسیا
فلوتاسیون انتخابی
تولید کنسانتره ۶۰-۷۰٪ WO₃
لیچینگ قلیایی
تولید APT (آمونیم پاراتنگستات)
تولید پودر تنگستن یا کاربرد تنگستن

در صورت غالب بودن Wolframite

خردایش
پرعیارسازی ثقلی (جداکننده لرزشی، میز لرزان)
جدایش مغناطیسی
تولید کنسانتره ۶۰-۶۵٪ WO₃

عیار اقتصادی

- ذخایر اسکارنی: ۰,۵ تا ۱,۵ درصد WO₃
- ذخایر پورفیری: ۰,۱ تا ۰,۴ درصد WO₃

هزینه تولید جهانی

برای تولید کنسانتره WO_3 : حدود ۸,۰۰۰ تا ۱۵,۰۰۰ دلار به ازای هر تن WO_3 (بسته به مقیاس، عمق معدن، و نوع کانی)

قیمت جهانی

قیمت APT معمولاً در بازه: ۲۵,۰۰۰ تا ۴۰,۰۰۰ دلار به ازای هر تن WO_3 در نوسان است.

مزیت‌های بالقوه ایران

- وجود کمربندهای ماگمایی غنی
- زیرساخت‌های معدنی مناسب
- امکان توسعه زنجیره تا کاربرد تنگستن
- بازار داخلی مصرف در صنایع نفت، گاز و ابزارسازی

برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول – شناسایی (۶ ماه)

- غربالگری زمین‌شناسی
- آنالیز ژئوشیمیایی
- تست ثقلی و فلوتاسیون آزمایشگاهی

فاز دوم – ارزیابی فنی (۹ ماه)

- پایلوت فرآوری
- تعیین بازیابی
- تحلیل CAPEX و OPEX

فاز سوم – توسعه صنعتی

- احداث واحد تولید APT
- امکان‌سنجی تولید کاربرد تنگستن

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 به صورت محصول جانبی همراه Ni و Cu

پلاسرهای PGM

در برخی پلاسرهای Rh به صورت جزئی دیده می شود.

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 Pt و Pd

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 می شود:

- 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 می شود:

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: ۰,۵ تا ۰,۵۰ گرم بر تن (اغلب بسیار کمتر از Pt و Pd).

قیمت جهانی

رودیوم یکی از پرنوسان‌ترین فلزات جهان است و در سال‌های اخیر بین ۵,۰۰۰ 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

ژرمانیوم

مقدمه و اهمیت راهبردی

ژرمانیوم فلزی نیمه‌رسانا و از عناصر بسیار استراتژیک است که کاربردهای آن شامل موارد زیر است:

- فیبر نوری
- سلول‌های خورشیدی پیشرفته (فضایی)
- سنسورهای مادون قرمز
- صنایع دفاعی و اپتیکی
- الکترونیک پیشرفته

تولید جهانی ژرمانیوم محدود و عمدتاً به عنوان محصول جانبی از فرآوری روی و زغال سنگ به دست می‌آید. تمرکز تولید در چین و تعداد محدودی کشور است.

تیپ‌های منبع ژرمانیوم در جهان

ژرمانیوم معمولاً ذخیره مستقل ندارد و به صورت همراه (By-product) استخراج می‌شود:

۱- کانسارهای روی نوع SEDEX و MVT

- حضور در اسفالریت (ZnS)
- بازیابی از لیچینگ کنسانتره روی

۲- ذخایر سرب-روی نوع مسیو سولفاید

- حضور به صورت جانشینی در شبکه اسفالریت

۳- خاکستر زغال سنگ

- برخی زغال سنگها دارای Ge قابل توجه
- بازیابی از خاکستر نیروگاه

وضعیت بالقوه در ایران

با توجه به ساختار زمین شناسی ایران، محتمل ترین مسیر تولید ژرمانیوم:

- بازیابی از کنسانتره های روی
- بررسی اسفالریت در ذخایر SEDEX
- ارزیابی ژرمانیوم در باطله های قدیمی کارخانه های روی

ایران دارای ذخایر قابل توجه روی است، لذا پتانسیل ژرمانیوم به عنوان محصول جانبی وجود دارد، ولی تاکنون بازیابی صنعتی آن انجام نشده است.

رویکرد پیشنهادی در فاز شناسایی

با توجه به اینکه ژرمانیوم معمولاً به صورت جانبی است، پیشنهاد می شود (تمرکز صرفاً بر شناسایی پتانسیل در فاز اول و بدون اکتشاف مستقل ژرمانیوم):

- نمونه برداری از کنسانتره های روی موجود
- آنالیز دقیق Ge با ICP-MS
- بررسی توزیع ژرمانیوم در باطله ها
- ارزیابی اقتصادی بازیابی در مقیاس صنعتی

- مسیر فرآوری پیشنهادی

۱- از کنسانتره روی

- تشویه کنسانتره
- لیچینگ اسیدی
- استخراج انتخابی (SX)
- خالص سازی
- سوبدهی یا الکترووینینگ
- تولید GeO_2 یا فلز ژرمانیوم

۲- از خاکستر زغال سنگ

- لیچینگ اسیدی
- استخراج حلالی
- تولید GeO_2

عیار معمول

در کنسانتره روی: ۵۰ تا ۵۰۰ ppm Ge

حد اقتصادی معمولاً بالاتر از ۱۰۰ ppm

هزینه تولید جهانی

هزینه تولید GeO_2 (به عنوان محصول): تقریباً ۸۰۰ تا ۱،۵۰۰ دلار به ازای هر کیلوگرم (بسته به اینکه به عنوان محصول جانبی یا مستقل تولید شود).

قیمت جهانی

قیمت ژرمانیوم فلزی: حدود ۱،۲۰۰ تا ۲،۰۰۰ دلار به ازای هر کیلوگرم (نوسان بالا به دلیل عرضه محدود).

مزیت‌های ایران

- ✓ وجود معادن بزرگ روی
- ✓ امکان بازیابی بدون نیاز به معدن جدید
- ✓ ارزش افزوده بسیار بالا
- ✓ سرمایه‌گذاری پایین نسبت به فلزات پایه

برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول – شناسایی (۶ ماه)

- آنالیز Ge در کنسانتره‌های روی
- تست لیچینگ آزمایشگاهی
- برآورد تئوریک تولید سالانه

فاز دوم – پایلوت (۹ ماه)

- طراحی مدار SX
- تولید آزمایشی GeO_2
- تحلیل CAPEX/OPEX

فاز سوم – توسعه صنعتی

- احداث واحد بازیابی جانبی
- اتصال به کارخانه‌های روی موجود

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 کربناتی

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

پلاسرهای 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 پرعیارسازی 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 پرعیارسازی
- 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)

قلع

مقدمه و اهمیت راهبردی

قلع فلزی استراتژیک با کاربرد گسترده در:

- لحیم کاری صنایع الکترونیک
- تولید آلیاژ برنز
- پوشش دهی فولاد (Tinplate)
- صنایع باتری های نسل جدید
- صنایع شیمیایی

بیش از ۶۰٪ مصرف جهانی قلع در صنایع الکترونیک است. تمرکز تولید جهانی در شرق آسیا (به ویژه چین و اندونزی) ریسک تأمین ایجاد کرده است.

-تیپ های کانساری قلع در جهان

۱- ذخایر رگه ای مرتبط با گرانیته (Lode/Vein Type)

- همراه با توده های گرانیته تکامل یافته
- کانی اصلی: Cassiterite (SnO_2)
- عیار نسبتاً بالا، تناژ متوسط

۲- ذخایر اسکارنی Sn-W

- همراه با تنگستن
- در مجاورت گرانیته و سنگ های کربناته

۳- ذخایر پورفیری Sn

- عیار پایین، تناژ بالا
- معمولاً همراه با Mo یا W

۴- ذخایر پلاسر (Alluvial)

- حاصل هوازدگی ذخایر اولیه
- اقتصادی‌ترین نوع در جهان
- استخراج کم‌هزینه

- وضعیت بالقوه ایران

با توجه به حضور گسترده گرانیتهای تکامل‌یافته در کمربندهای ماگمایی ایران، بیشترین پتانسیل قلع در:

- رگه‌های کوارتز-کاسیتريت
- سیستم‌های Sn-W
- بررسی پلاسره‌های قدیمی

قابل بررسی است. در حال حاضر ذخیره بزرگ و فعال قلع در کشور گزارش نشده و تمرکز باید بر بازنگری سیستماتیک داده‌های قدیمی و آنومالی‌های ژئوشیمیایی قلع باشد.

- رویکرد پیشنهادی در فاز شناسایی

با توجه به ریسک اکتشاف قلع، فاز اول صرفاً شامل:

۱. غربالگری مناطق گرانیتهی تکامل‌یافته
۲. بررسی آنومالی‌های Sn در داده‌های ژئوشیمی
۳. نمونه‌برداری رسوبات آبراهه‌ای (Heavy Mineral Sampling)
۴. بررسی کانی‌های سنگین با میز لرزان
۵. آنالیز ICP-MS برای Sn, Nb, W, Ta

فرآوری پیشنهادی

- در ذخایر اولیه (Primary)

- خردایش
- پرعیارسازی ثقلی (Jig، میز لرزان، اسپیرال)
- جدایش مغناطیسی (حذف آهن)
- فلوتاسیون در صورت نیاز
- تولید کنسانتره ۵۰-۷۰٪ Sn

-در ذخایر پلاسر

- شستشو
- جدایش ثقلی
- حداقل هزینه خردایش

- متالورژی

- ذوب احیایی در کوره
- تولید شمش قلع ۹۹,۸-۹۹,۹۵٪

- عیار اقتصادی

- ذخایر اولیه: ۰,۵ تا ۱ درصد Sn
- پلاسرها: ۰,۱ تا ۰,۳ درصد Sn

- هزینه تولید جهانی

هزینه تولید کنسانتره: حدود ۴,۰۰۰ تا ۸,۰۰۰ دلار به ازای هر تن Sn محتوی (وابسته به مقیاس و روش استخراج)

هزینه تبدیل کنسانتره به شمش: ۱,۰۰۰ تا ۲,۰۰۰ دلار به ازای هر تن

قیمت شمش قلع: معمولاً در بازه ۲۲,۰۰۰ تا ۳۰,۰۰۰ دلار به ازای هر تن در نوسان است.

-مزیت‌های بالقوه ایران

- وجود گرانیتهای تکامل یافته
- هزینه انرژی پایین تر نسبت به میانگین جهانی
- امکان توسعه زنجیره تا شمش
- بازار داخلی مصرف در صنایع الکترونیک و لحیم

– برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول – شناسایی پتانسیل (۶ ماه)

- غربالگری زمین شناسی
- نمونه برداری آبراهه‌ای
- تست ثقلی آزمایشگاهی

فاز دوم – ارزیابی فنی (۹ ماه)

- پایلوت فرآوری
- تعیین بازیابی واقعی
- مدل سازی اقتصادی

فاز سوم – توسعه صنعتی

- احداث واحد کنسانتره
- احداث کوره ذوب کوچک مقیاس
- بررسی توسعه آلیاژهای تخصصی

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 زیردریایی

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 فلوئتاسیون
- تولید کنسانتره مشترک Cu-Ni-Co
- لیچینگ اسیدی کنسانتره
- حذف اولیه آهن و عناصر مزاحم (رسوب‌دهی کنترل‌شده)
- 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 به‌عنوان محصول جانبی از ذخایر Cu-Ni: حدود ۷,۰۰۰ تا ۱۲,۰۰۰ دلار به ازای هر تن کبالت است.

۲- قیمت جهانی

قیمت جهانی کبالت طی سال‌های اخیر بین ۳۰,۰۰۰ 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 باتری محور

- برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول (۶ ماه)

- غربالگری زمین شناسی و ژئوشیمیایی
- نمونه برداری 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 بهره برداری

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
 - فلوتاسیون 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 فلوتاسیون

^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 ۱۰ تا ۱۵ دلار به ازای هر تن کانسنگ خوراک

با فرض عیار ۱٪ نیکل و بازیابی ۷۵٪: هزینه تولید هر تن کنسانتره نیکل حدود ۳،۰۰۰ 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 ۴،۰۰۰ تا ۷،۰۰۰ دلار به ازای هر تن نیکل فلزی

در پروژه‌های لاتریتی (HPAL): هزینه تولید کامل فلز نیکل معمولاً بین ۸،۰۰۰ 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: ۱۶،۰۰۰ 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

وانادیوم

مقدمه و ضرورت طرح

وانادیوم یکی از فلزات استراتژیک مورد استفاده در:

- فولادهای میکروآلیاژی
- سوپرآلیاژها
- باتری‌های ذخیره انرژی نوع Vanadium Redox Flow
- صنایع شیمیایی و کاتالیستی

تقاضای جهانی وانادیوم به دلیل رشد زیرساخت‌ها و انرژی‌های تجدیدپذیر در حال افزایش است. برخلاف کبالت، وانادیوم در برخی تیپ‌های کانساری می‌تواند به صورت ذخیره اصلی یا محصول جانبی اقتصادی تولید شود.

تیپ‌های زمین‌شناسی اولویت‌دار در ایران

۱- مگنتیت‌های تیتانو-وانادیفیر (Fe-Ti-V): مهم‌ترین تیپ جهانی وانادیوم.

ویژگی‌ها:

- سنگ‌های مافیک و لایه‌ای
- مگنتیت حاوی V
- همراهی تیتانیم

در این ذخایر، وانادیوم در ساختار بلوری مگنتیت جانشین آهن می‌شود. در جهان نمونه‌های شاخص شامل ذخایر روسیه، چین و آفریقای جنوبی هستند.

۲- شیل‌های سیاه غنی از V

وانادیوم می‌تواند در محیط‌های رسوبی احیایی تمرکز یابد. در برخی نقاط ایران، سازندهای شیل سیاه نیازمند بررسی ژئوشیمیایی برای V هستند.

۳- سرباره‌ها و پسماندهای فولادی

در بسیاری از کشورهای تولیدکننده فولاد، وانادیوم به‌صورت محصول جانبی از سرباره فولادسازی بازیابی می‌شود. این مسیر برای ایران به‌دلیل ظرفیت بالای فولادسازی اهمیت ویژه دارد.

تمرکز بر شناسایی پتانسیل

در این مرحله، اکتشاف صرفاً در حد تعیین ظرفیت اقتصادی انجام می‌شود:

اقدامات پیشنهادی:

- گردآوری داده‌های ژئوشیمیایی Fe-Ti-V
- بازنمونه‌برداری از کانسارهای مگنتیتی
- آنالیز ICP-MS برای V_2O_5
- بررسی شیمی سرباره واحدهای فولادی
- تعیین فاز کانی‌شناسی V در مگنتیت

سناریوهای فرآوری

۱- استحصال از مگنتیت وانادیفِر

- خردایش و پرعیارسازی مغناطیسی
- تولید کنسانتره مگنتیت
- تشویه اکسیدی با نمک سدیم
- لیچینگ قلیایی
- استخراج وانادیوم از محلول
- تولید V_2O_5 یا Ferrovandium

۲- استحصال از سرباره فولاد

خردایش سرباره

لیچینگ قلیایی

تصفیه محلول

رسوبدهی وانادیوم

این مسیر CAPEX پایین تری دارد زیرا استخراج معدن نیاز نیست.

عیار اقتصادی

در ذخایر مگنتیتی: عیار اقتصادی معمولاً ۰,۳ تا ۱,۰ درصد V_2O_5

در شیل های سیاه: ۰,۵ تا ۱,۵ درصد V_2O_5

هزینه تولید جهانی

بسته به تیپ ذخیره:

- از مگنتیت اولیه: حدود ۶,۰۰۰ تا ۹,۰۰۰ دلار به ازای هر تن V_2O_5
- از سرباره فولاد: حدود ۴,۰۰۰ تا ۷,۰۰۰ دلار به ازای هر تن V_2O_5

قیمت جهانی

قیمت V_2O_5 در سال های اخیر در بازه: ۸,۰۰۰ تا ۱۵,۰۰۰ دلار به ازای هر تن در نوسان بوده است.

مزیت ایران در توسعه وانادیوم

- وجود پتانسیل مگنتیت‌های تیتانو-وانادیفر
- صنعت فولاد گسترده و تولید سرباره قابل توجه
- امکان تولید فرووانادیوم در کنار فولادسازی
- بازار داخلی مصرف در صنعت فولاد

برنامه اجرایی پیشنهادی

فاز اول – شناسایی (۶ ماه)

- غربالگری زمین‌شناسی
- آنالیز نمونه‌ها
- بررسی سرباره‌ها
- تست لیچینگ آزمایشگاهی

فاز دوم – ارزیابی فنی (۹ ماه)

- پایلوت فرآوری
- تعیین بازیابی
- محاسبه CAPEX و OPEX

فاز سوم – طراحی صنعتی

- احداث واحد تولید V_2O_5 یا Ferrovanadium
- اتصال به زنجیره فولاد