طراحی فرایند فرآوری شن‌های پلاسری تیتانومگنتیت جهت استحصال همزمان عناصر وانادیم، تیتانیم و آهن

مهدی علی‌زاده[*1]

[1] *پژوهشگاه مواد و انرژی*، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، کرج، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۳/۶/۲۱، **تاریخ دریافت نسخهٔ اصلاح‌شده:** ۱۳۹۴/۱/۱۵، **تاریخ پذیرش قطعی:** ۱۳۹۴/۳/۹

چکیده انجام عملیات فرآوری، تغلیظ و استخراج بر روی برخی از معادن پلاسری دارای توجیه فنی و اقتصادی بوده به طوری‌که استحصال همزمان برخی عناصر استراتژیک و با ارزش افزوده بالا، استفاده از این نوع معادن را به عنوان ماده اولیه در صنایع تولید فلزات آهنی و غیرآهنی امکان‌پذیر می‌نماید. هدف از انجام طرح پژوهشی حاضر، امکان‌سنجی پرعیار سازی کانی‌های پلاسری موجود در منطقه خراسان جنوبی با رویکرد استحصال همزمان آهن، تیتانیم و وانادیم بوده است. در پژوهش حاضر ابتدا نمونه معدن پلاسری مورد نظر که حاوی ترکیبات آهنی بوده مورد مطالعه و ارزیابی اولیه قرار گرفت. در این رابطه با انجام آزمون‌های اولیه خواص فیزیکی و شیمیایی نمونه معدنی از جمله توزیع دانه‌بندی، نوع ترکیبات فازی و همچنین ترکیب شیمیایی عناصر تعیین گردید. سپس عملیات آماده سازی جهت تهیه مقطع صیقلی و انجام مطالعات تعیین درجه آزادی و بررسی‌های میکروسکوپی توسط میکروسکوپ‌های نوری (OM) و الکترونی پروبی (EPMA) صورت پذیرفت. به منظور دستیابی به عیاری مناسب برای آهن، تیتانیم و وانادیم به کمک روش جداسازی ثقلی، خردایش مواد و روش‌های مختلف جدایش مغناطیسی یک مدار فرآوری طرحریزی شده، به طوری‌که امکان دستیابی به عیار ۵۷ درصد وزنی برای آهن، عیار حدود ۸ درصد وزنی برای اکسید تیتانیم و عیار حدود ۰/۸ درصد وزنی برای پنتا اکسید وانادیم فراهم گردیده است. استحصال وانادیم از کنسانتره توسط فرایند لیچینگ با آب گرم و همچنین جداسازی اکسید تیتانیم در طی فرایند ذوب آهن موجود در کنسانتره و ورود آن به سرباره اساس فرایند استخراج آهن، تیتانیم و وانادیم را از کنسانتره حاصل از معادن پلاسری فراهم می سازد.

کلمات کلیدی: تیتانومگنتیت، فرآوری، پرعیارسازی، وانادیم، تیتانیم، آهن.

Process Design of Titanomagnetite Placer Mine Beneficiation for Co-Extraction of Vanadium, Titanium and Iron Elements

Mehdi Alizadeh[*1]

[1] *Materials and Energy Research Center, Nanotechnology and Advanced Materials Department, Karaj, Iran*

Abstract Principally, mineral processing and beneficiation process on some placer mines can be considered from two points of view i.e. technical and economical aspects. Although, co-extraction of some strategic elements with high added value is conceivable, utilizing of these type of mines is also possible as raw material and feed in ferrous and non-ferrous metal industry. In this research, feasibility study of placer mine beneficiation for co- extraction of strategic elements and Iron has been investigated. Firstly, mineralogy, chemical properties and physical properties of samples have been studied via different characterization methods such as: screening, XRD, XRF, OM and EPMA analysis. Furthermore an appropriate process has been designed by using the gravity separation, ball mill grinding and magnetite separation in order to achieve suitable fineness for iron, titanium and vanadium concentrates. The designed process is capable of producing the ore concentrate with approximate 57 wt% Iron, 8 wt% TiO_2 and 0.8 wt% V_2O_5. The outcome of the aforementioned process is valuable since it has been shown in the literature that the extraction of vanadium can be completed by leaching process with hot water and separation of titanium can be achieved during the melting process of iron from the slag.

Keywords: Titanomagnetite, mineral processing, beneficiation, Vanadium, Titanium, Iron.

* عهده‌دار مکاتبات

نشانی: کرج، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی، تلفن: ۰۹۱۳۳۲۶۲۷۵۵، دورنگار: ، پیام‌نگار: mehdializadeh@merc.ac.ir

۱- مقدمه

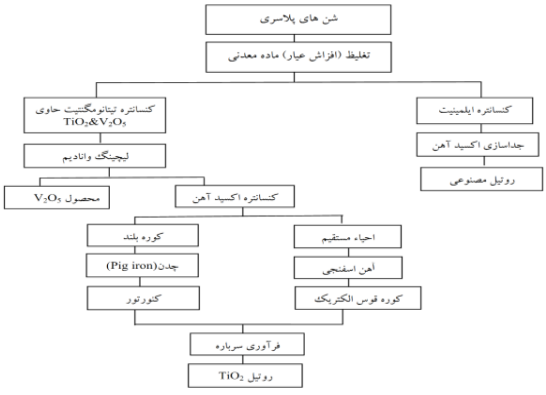
گستره پراکندگی "شن‌های ساحلی" معروف به شن‌های آهنی یا پلاسری در سراسر کره زمین بسیار وسیع می‌باشد. تحت شرایط مطلوب امکان تشکیل ذخایر پلاسری (که در برخی از موارد، دربرگیرنده ترکیبات تیتانومگنتیت نیز می‌باشند)، به‌وجود آمده است. ترکیبات تیتانومگنتیت‌ها علاوه بر حضور در ذخایر متعدد تیتانوفروس، در شن‌های ساحلی نیز گسترش یافته‌اند. به طور کلی، تیتانومگنتیت‌ها منشأ آتشفشانی داشته و آهن موجود در آن‌ها به صورت ذخایر رسوبی (شن‌های ساحلی) یافت می‌شوند. بهره‌برداری از شن‌های ساحلی نسبتاً ساده بوده و به دلیل هزینه پایین حفاری و افزایش عیار، بهره‌برداری از ذخایر نسبتاً کوچک نیز مقرون به صرفه می‌باشد. آنها در بسیاری از موارد با مواد معدنی با ارزش دیگری نیز مرتبط هستند. در سال‌های اخیر، علاقه روبه رشدی در بهره‌برداری از این منابع و تولید محصولات تجاری از آنها مانند آهن و فولاد، کنسانتره‌های اکسید تیتانیم و وانادیم مشاهده شده است به‌طوری‌که ذخایر شن‌های ساحلی در چندین کشور، پایه صنعت متالورژی آنها را تشکیل داده است [۱و۲]. جدول (۱) ترکیب شیمیایی کنسانتره تولیدی از شن‌های ساحلی کشور نیوزلند را نشان می‌دهد. همچنان که اشاره شده کانی‌های تیتانومگنتیتی عمدتاً محتوی فلزات با ارزشی چون آهن (Fe)، تیتانیم (Ti) و وانادیم (V) می باشند[۳].

جدول ۱. ترکیب شیمیایی کنسانتره تولیدی از شن‌های ساحلی کشور نیوزلند[۳].

ترکیبات	Fe	TiO_2	V_2O_5	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	S	P
مقدار درصد وزنی	۵۸/۰	۸/۰	۰/۶	۳/۷	۳/۰	۴/۲	۱/۰	۰/۰۰۴	۰/۰۶

با توجه به نوع ترکیبات کانی، میزان عیار هر کدام از عناصر مورد نظر در کانی و نحوه درگیری کانی‌های مختلف با یکدیگر، به روش‌های مختلفی این نوع کانی‌ها به عنوان ماده اولیه در فرایندهای مختلف استخراج و با هدف بازیابی آهن، اکسید تیتانیم و پنتا اکسید وانادیم مورد مصرف قرار گرفته‌اند. همچنان که ملاحظه می‌شود کانی‌های تیتانومگنتیتی عمدتاً محتوی فلزات با ارزشی چون: آهن، تیتانیم و وانادیم می باشند [۴]. مقایسه میزان تقاضای مصرف برای سه عنصر ذکر شده در بازارهای جهانی نشان می‌دهد پس از فلز وانادیم، آهن و تیتانیم به ترتیب دارای بیشترین ارزش اقتصادی می‌باشند. لازم به اشاره است در این مقایسه کلیه ملاحظات فنی و نحوه استخراج و هزینه‌های مربوط به فرایندهای فرآوری و استخراج فلزات نیز لحاظ گردیده است [۵ و۶].

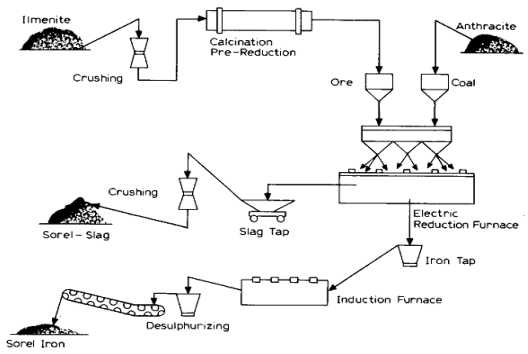
فلوچارت شکل (۱) مثالی از روش‌های ممکن و متعدد برای فرآوری تیتانومگنتیت را نشان می‌دهد. در ادامه جزییات مربوط به هر کدام از فرایندها و روش‌های صنعتی متداول مورد استفاده برای کانی‌های پلاسری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به این که محدوده مقدار هر یک از عناصر در کانی‌های پلاسری تیتانومگنتیتی بسیار گسترده و متنوع می‌باشد لذا براساس مقدار و نوع عنصر مورد نظر و همچنین مشخصات فیزیکی کانی، روش‌های مختلفی برای استحصال عناصر مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به دانه‌بندی ریز و اندازه ذرات کوچک منابع پلاسری، استفاده مستقیم از آن‌ها در فرآیندهای استخراج محدودیت‌هایی را به وجود می‌آورد. لذا از این منابع به عنوان ماده اولیه در فرایندهای متداول صنعتی پایرومتالورژی بایستی به صورت تولید گندله مورد مصرف قرار گیرد، در غیر این صورت مستلزم طراحی فرآیندهای ویژه ای مانند SL-RN خواهد بود. [۷].



شکل ۱. محصولات فرآوری حاصل از ماده معدنی پلاسری محتوی تیتانومگنتیت [۷].

برای تهیه بار کوره SL-RN مواد آهن‌دار شن‌های ساحلی (پلاسری) مورد بهره‌برداری قرار گرفته و در ابتدا مواد اولیه وسط روش‌های جداسازی مغناطیسی و ثقلی عیار آنها افزایش یافته است به‌طوری‌که با استفاده از روش جداسازی مغناطیسی به تنهایی می‌توان کنسانتره‌ای حاوی ٪۵۴–۵۲ آهن با نرخ‌های بازیابی بالا تولید نمود. در ادامه مقدار عیار آهن با به کارگیری روش جداسازی ثقلی به ٪۵۹–۵۷ افزایش می‌یابد ولی در این روش نسبت به روش جدایش مغناطیسی نرخ بازیابی کاهش می‌یابد.

برای فرآوری سنگ معادن حاوی اکسید آهن و تیتانیا، تولید محصول تجاری آهن در کنار سرباره غنی از تیتانیا مجاز می‌نماید. این فرآیند، توسعه یافته و به صورت صنعتی در سورل[1] کانادا انجام می‌شود. فلودیاگرام فرآیند معروف سورل در شکل (۲) ترسیم شده است. ایلمنیت بعد از کلسیناسیون و احیای جزیی به کوره الکتریکی احیا، شارژ می‌شود. در صورتی که ذغال احیا استفاده شود، محصولات تجاری، سرباره حاوی تیتانیا (مشهور به سرباره سورل) و چدن به دست می‌آیند. در واحد سورل به طور مثال، کنسانتره ایلمنیت با ٪۳۵ تیتانیا و ٪۵۳ اکسید آهن تحت فرآیند قرار می‌گیرند و سرباره تولیدی حاوی ۷۰ تا ٪۷۵ تیتانیا می‌باشد. یک واحد تولیدی دیگر بر طبق این فرآیند در آفریقای جنوبی نصب شده است. در نروژ نیز پروژه جدیدی با به‌کارگیری یک فلودیاگرام اصلاح شده بر روی فرایند پیش احیا، تحت بررسی می‌باشد [۸و۹].

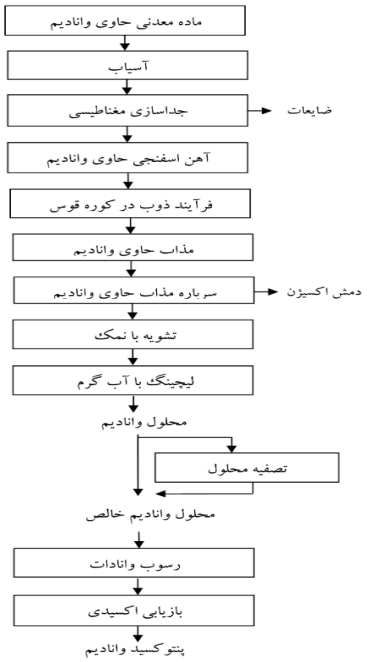


شکل ۲. فرآوری ایلمنیت مطابق با فرآیند سورل (کانادا).

وانادیم یکی از عناصر مهم در تولید فولادهای آلیاژی و همچنین به عنوان ماده کاتالیستی در صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بزرگترین منابع در دسترس، مگنتیت حاوی وانادیم یا تیتانومگنتیت می‌باشد که فلز از طریق پایرومتالورژی به عنوان فروواندیم و توسط مراحل ترکیبی پایرومتالورژی و هیدرومتالورژی بازیابی می‌شود.

بازیابی وانادیم از ذخایر پلاسری با روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد که در نمودار شکل (۳) ترسیم شده است. در صورت جدایش آسان مگنتیت و ایلمنیت در سنگ معدن، ابتدا به صورت مغناطیسی از هم جدا شده و سپس از کنسانتره مگنتیت برای بازیابی وانادیم استفاده می‌شود. روش‌های مورد استفاده به دو دسته هیدرومتالورژی و پایرومتالورژی تقسیم‌بندی می‌گردد. در روش هیدرومتالورژی وانادیم موجود در سنگ معدن توسط فرایند پخت تبدیل به یک نمک محلول در آب می‌شود. در روش پایرومتالورژی، وانادیم موجود در سنگ معدن همراه با آهن خام (چدن) ذوب شده و سپس با دمش اکسیژن به چدن مذاب در کنورتور، وانادیم اکسید شده و سرباره غنی از وانادیم تولید می‌شود. این سرباره توسط تشویه نمک، با روش هیدرومتالورژی تحت فرآوری قرار می‌گیرد. در طی تشویه نمک، وانادیم اکسید شده و وانادیم پنج ظرفیتی با نمک سدیم به منظور تشکیل وانادات سدیم محلول در آب واکنش می‌دهد. نمک‌های موجود برای تشویه وانادیم در منابع تیتانومگنتیت شامل کلریدسدیم، سولفات سدیم و کربنات سدیم می‌باشند که کربنات سدیم، معمول‌ترین ترکیب در عملیات تشویه تجاری بوده و دمای معمول تشویه نمک در محدوده ۹۵۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد [۱۰و۱۱].

[1]-Sorel



شکل۳. فلودیاگرام فرآیندی بازیابی وانادیم از تیتانوفروس مگنتیت حاوی وانادیم.

در این مقاله ابتدا مطالعات کانی‌شناسی بر روی نمونه‌های پلاسری انجام و پس از تعیین درجه آزادی و نحوه درگیری ترکیبات مورد نظر در کانی با مواد باطله، مدار فرآوری مناسب برای پرعیارسازی ترکیبات حاوی آهن، تیتانیم و وانادیم پیشنهاد شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مطالعات کانی‌شناسی

به منظور انجام مطالعات کانی‌شناسی و تعیین درجه آزادی برای ترکیبات تیتانومگنتیت آزمون‌های مختلفی شامل آنالیز سرندی، آنالیزهای عنصری و فازی، مطالعات میکروسکوپی نوری و الکترونی پروبی EPMA روی نمونه معدنی مورد نظر صورت گرفته است.

آنالیز سرندی- با به‌کارگیری یک سری الک از ابعاد چشمه‌های درشت به ریز (۸ سرند در یک سری) و با استفاده از دستگاه لرزاننده آنالیز سرندی صورت گرفته است. برای آنالیز توزیع دانه‌بندی نمونه‌ها با غربال، مقدار ۲۰۰ گرم از نمونه اولیه به مدت ۲۰ دقیقه با دامنه نوسان ۰/۲ میلیمتر در دستگاه شیکر الک انجام گردیده است.

داده‌های منحنی‌های آنالیز سرندی به صورت درصد تجمعی زیر سرند برحسب اندازه می‌باشد. معمولاً دامنه اندازه ذرات برحسب اندازه‌ای که از آن ۸۰٪ مواد عبور می‌کنند (d_{80}) بیان می‌شود.

آنالیز فازی و شیمیایی- از روش آنالیز XRD به منظور مطالعه نوع ترکیبات فازی موجود در ماده پلاسری و از روش آنالیز XRF به منظور تعیین کیفی و نیمه کمی عناصر موجود در کنسانتره پلاسری استفاده شده است. جهت محاسبه درصد مواد فرار نمونه‌های معدنی (LOI)، کوره موفلی ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد تحت دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت بکار گرفته شد.

مطالعات میکروسکوپی- به منظور بررسی وضعیت قرارگیری کانی‌های مفید (حاوی آهن، تیتانیم و وانادیم) و باطله‌ها و تعیین درجه آزادی و انجام مطالعات کانی‌شناسی، مقاطع مختلف نازک- صیقلی و صیقلی از نمونه‌ها در ۴ فراکسیون با ابعاد (۵۰۰+ ۱۰۰۰-)، (۳۰۰+۵۰۰-)، (۱۵۰+ ۳۰۰-) و (۷۵+۱۵۰-) تهیه شده و توسط میکروسکوپ نوری پلاریزان Zeiss مدل Axioplan 2 با نور انعکاسی و نور عبوری و همچنین میکروسکوپ الکترونی پروبی EPMA مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نحوه درگیری‌ها، قفل‌شدگی‌ها در مطالعات میکروسکوپی و شناسایی نوع گانگ‌ها توسط مطالعات میکروسکوپی قابل انجام است.

تعیین درجه آزادی- برای تعیین درجه آزادی کانه از باطله‌های همراه، روش شمارش میکروسکوپی ذرات استفاده گردید. در این روش دانه‌های آزاد و درگیر کانه توسط میکروسکوپ پلاریزان شمارش شده و درجه آزادی کانه به کمک رابطه زیر محاسبه شد [۲]:

$$df = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \times 100$$

در رابطه فوق: df = درجه آزادی کانه، n_1= تعداد دانه‌های آزاد و n_2 = تعداد دانه‌های درگیر در کانه می‌باشد. جهت مطالعات درجه آزادی، ابتدا مقاطع صیقلی از نمونه‌های فراکسیون‌بندی شده کنسانتره (برحسب میکرون) در ابعاد (۵۰۰+ ۱۰۰۰–)، (۳۰۰+ ۵۰۰–)، (۱۵۰+ ۳۰۰–) و (۷۵+ ۱۵۰–) تهیه و سپس توسط میکروسکوپ مورد مطالعه قرار گرفت . هدف از مطالعات درجه آزادی تعیین ابعادی است که در آن ابعاد، کانه از باطله جدا شده باشد. درجه آزادی پارامتر بسیار مهم در انتخاب روش فرآوری (ثقلی، مغناطیسی و فلوتاسیون) است. در فرآیندهای کانه‌آرایی ابعاد بار ورودی به یک سیستم پرعیارسازی، مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر بازیابی آن سیستم می‌باشد. محاسبه درجه آزادی مخصوصاً برای ذخایری در ابعاد ریز مانند پلاسری بسیار مشکل است و یک روش عملی با خطای قابل قبول، مطالعات میکروسکوپی می‌باشد. برای مطالعه درجه آزادی باید از هر دو نوع مقطع (صیقلی و نازک) استفاده نمود و از تطبیق این دو، نتیجه‌گیری کرد. در مطالعات حاضر به روش شمارش میکروسکوپی در فراکسیون‌های مختلف ابعادی، درجه آزادی کانی‌های حاوی مگنتیت، هماتیت و تیتانومگنتیت اندازه‌گیری شده است.

۲-۲- فرآیند فرآوری

به منظور پرعیارسازی کانی‌های حاوی ذرات آهن، تیتانیم و وانادیم و همچنین جداسازی مواد باطله از آنها از روش‌های زیر بهره گرفته شده است:

جدایش مغناطیسی– از دستگاه‌های جداکننده مغناطیسی خشک شدت بالا (DHIMS[۲])، جداکننده مغناطیسی تر شدت پایین (WLIMS[۳]) و جداکننده مغناطیسی تر شدت بالا (WHIMS[۴]) برای جداسازی ناخالصی‌های غیرمغناطیسی از ترکیبات آهندار استفاده شده است [۵].

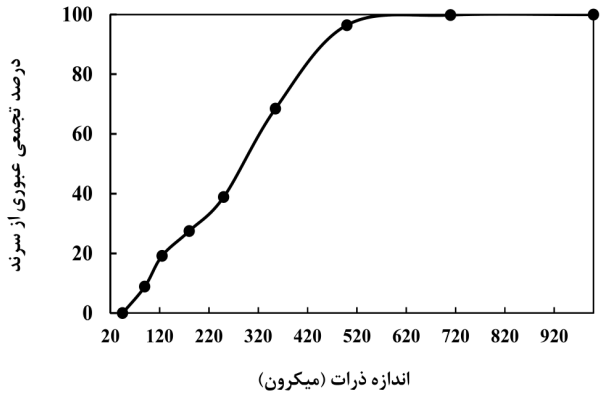
میز لرزان – عملیات پرعیار سازی ثقلی توسط دستگاه میز لرزان آزمایشگاهی صورت گرفته است.

خردایش– از یک دستگاه آسیای گلوله‌ای با آستر لاستیکی و با گلوله‌هایی از جنس فولاد ضدزنگ به منظور کاهش اندازه ذرات به روش تر استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی توزیع اندازه دانه‌بندی نمونه معدنی

به منظور آگاهی از توزیع دانه‌بندی ذرات در نمونه‌های معدنی، ماده اولیه از الک‌های با اندازه مش‌های مختلف عبور داده شده و توزیع دانه‌بندی ذرات علاوه بر ماده اولیه معدنی صورت گرفته است. در شکل (۴) اطلاعات مربوط به اندازه‌گیری‌های انجام گرفته، گزارش شده است.



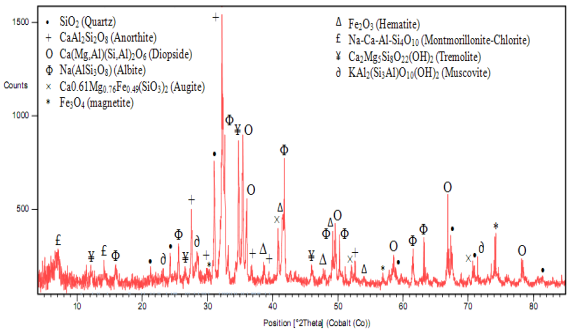
شکل ۴. درصد تجمعی ذرات عبوری از سرند برای نمونه‌های ماده معدنی.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود دامنه اندازه ذرات در این ماده معدنی بین ۲۰ تا ۵۵۰ میکرون است. گستره اندازه ذرات در این نمونه نسبتاً محدود می‌باشد و مقدار متوسط اندازه ذرات در این نمونه نیز ۳۲۰ میکرون است. در ادامه با انجام مطالعات فازی و آنالیز شیمیایی اطلاعات کامل‌تری در این رابطه بدست خواهد آمد.

[2-] Dry High Intensity Magnetic Separator
[3-]Wet Low Magnetic Intensity Separator
[4-]Wet High Intensity Magnetic Separator

۳-۲- بررسی آنالیز فازی XRD و آنالیز عنصری XRF

نتایج آنالیز فازی XRD ماده معدنی در شکل (۵) ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود نمونه حاوی ترکیبات آهن‌دار مگنتیت و هماتیت بوده و ترکیبات دیگری از قبیل کوارتز (SiO_2)، فلدسپار (آنورتیت) $CaAl_2Si_2O_8$ دیوپسید $Ca(Mg,Al)(Si,Al)_2O_6$، آلبیت $Na(AlSi_3O_8)$ و اوژیت $Ca_{0.61}Mg_{0.76}Fe_{0.49}(SiO_3)_2$ در آن دیده شده است. آنالیز عنصری نمونه ماده معدنی اولیه در جدول (۲) ارائه شده است. عیار بسیار پایین آهن در ماده اولیه (حدود ۶ درصد وزنی) و حضور بسیار مشهود ترکیبات سیلیسی و آلومینایی و همچنین ترکیبات معدنی سدیمی و کلسیمی از دیگر مشخصه‌های این ماده معدنی به شمار می‌رود.



شکل ۵. طیف مربوط به آنالیز XRD ترکیبات فازی موجود در نمونه معدنی.

جدول ۲. آنالیز عنصری XRFعناصر موجود در کانه اولیه پلاسری.

ترکیبات	Fe	Ti	Na	Si	Mg	Al	Ca	V	K
مقدار درصد وزنی	۵/۶	۲/۶	٤/۵	۲٤/۷	۳/۲	۸/۱	٤/۵	۰/۰۵	۲/٦

به طور کلی پایین بودن عیار در ماده اولیه هزینه‌های فرآوری و تولید را افزایش می‌دهد. البته ذکر این نکته ضروری است که در این نوع پلاسری ترکیبات حاوی وانادیم و تیتانیم با کانی‌های آهن‌دار مگنتیتی همراه بوده و ملاحظات لازم مدنظر قرار گرفته شود.

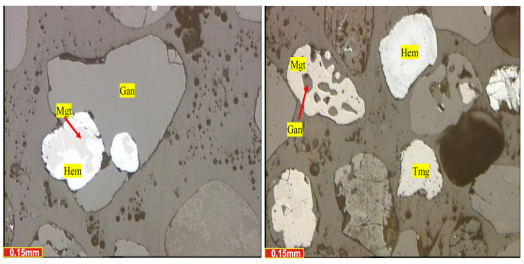
۳-۳- بررسی‌های میکروسکوپی مقاطع صیقلی نمونه‌های مربوط به فراکسیون‌های مختلف

نتایج بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده توسط میکروسکوپ نوری در ادامه آمده است. حروف اختصاری کانی‌های موجود در نمونه‌ها که بر روی تصاویر میکروسکوپی ذکر شده در جدول (۳) مشاهده می‌شود.

جدول ۳. علائم اختصاری کانی‌های موجود در نمونه معدنی.

ردیف	نام کانی	Name	فرمول شیمیایی (Chemical formula)	علامت اختصاری (Symbol)
۱	هماتیت	Hematite	Fe_2O_3	Hem
۲	مگنتیت	Magnetite	Fe_3O_4 $[FeO.Fe_2O_3]$	Mgt
۳	تیتانومگنتیت	Titanomagnetite	$Fe(Ti)Fe_2O_4$ $[FeO.(Fe_2O_3)_x.(TiO_2)_{1-x}]$	Tmg
۴	ایلمنیت	Ilmenite	$FeTiO_3$ $[FeO.TiO_2]$	Ilm
۵	باطله	Gangue	-	Gan

تصویر میکروسکوپی و نوع درگیری‌ها در ذرات کانی در شکل (۶) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشتر هماتیت‌ها احتمالا در اثر اکسیداسیون مگنتیت تشکیل گردیده‌اند. اکسیداسیون مگنتیت به هماتیت موجب تشکیل تیغه‌هایی از هماتیت در بین سطوح بلوری مگنتیت شده و علاوه بر آن تیغه‌هایی از ایلمنیت و تیتانومگنتیت نیز در مگنتیت‌ها دیده می‌شود. فراوانی مگنتیت و هماتیت در حدود ۱۵ درصد گزارش شده است. مقادیر اندکی ایلمنیت به صورت تیغه‌هایی در داخل هماتیت و مگنتیت دیده شده اما ایلمنیت آزاد در نمونه مشاهده نمی‌شود. تیتانومگنتیت به صورت هم‌رشدی با مگنتیت در برخی موارد وجود دارد که فراوانی آن کمتر از ۲ درصد است. مگنتیت بیشترین همراهی را با پیروکسن و سپس با پلاژیوکلاز دارد. ارتباط این کانی‌ها به گونه‌ای است که ادخال‌هایی از مگنتیت در باطله و نیز ادخال‌هایی از باطله در مگنتیت مشاهده می‌شود.



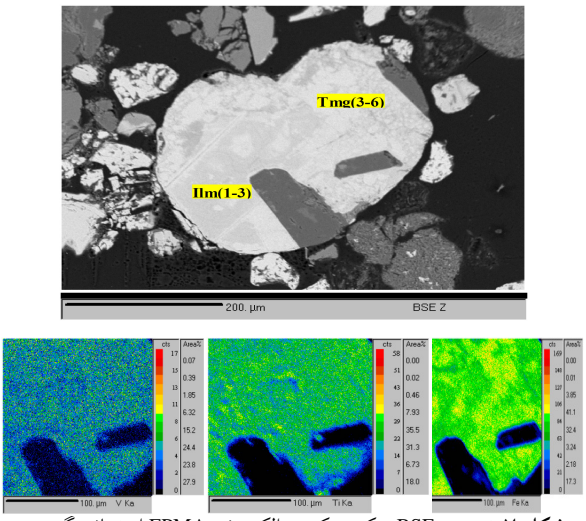
شکل ۶. مگنتیت مارتیتی شده در کنار مگنتیت آزاد در نمونه با اندازه ذرات مختلف (نور انعکاسی PPL).

نتایج مطالعات درجه آزادی انجام شده بر روی مقاطع در جدول (۴) آورده شده است. این مطالعات نشان می‌دهد که بیشترین درگیری‌ها از نوع تماسی (بین کانی‌های فلزی و باطله) و ادخال‌ها و تیغه‌های موجود در کانی‌های باطله می‌باشد. اندازه بیشتر این ادخال‌ها کمتر از ۰/۱ میلیمتر است. مگنتیت بیشترین همراهی را با پیروکسن و سپس با پلاژیوکلاز دارد. ارتباط این کانی‌ها به گونه‌ای است که ادخال‌هایی از مگنتیت در باطله و نیز ادخال‌هایی از باطله در مگنتیت دیده می‌شود. تیغه‌های ایلمنیت در مگنتیت به وفور در نمونه قابل مشاهده است. مارتیتی شدن موجب شده که هماتیت در بین سطوح بلوری و رخ‌های موجود در مگنتیت تشکیل و این امر تفکیک این کانی‌ها را از هم مشکل نموده است.

جدول۴. درجه آزادی کانی‌ها برحسب درصد در نمونه با فراکسیون‌های مختلف.

نام کانی / اندازه ذرات میکرون	مگنتیت+هماتیت+تیتانومگنتیت	
	درگیر (٪)	آزاد (٪)
-۱۰۰۰+۵۰۰	۹۰	۱۰
-۵۰۰+۳۰۰	۷۵	۲۵
-۳۰۰+۱۵۰	۲۷	۷۳
-۱۵۰+۷۵	۱۷	۸۳

در شکل (۷) یکی از ذرات حاوی ترکیبات تیتانومگنتیت توسط میکروسکوپ الکترونی پروبی EPMA مورد بررسی قرار گرفته که در آن الگوی پراکندگی عناصر آهن، تیتانیم و وانادیم در ذره توسط دستگاه آنالیز عنصری WDS نصب شده بر روی میکروسکوپ الکترونی پروبی EPMA تعیین شده است.



شکل ۷. تصویر BSE میکروسکوپ الکترونی EPMA از تیتانومگنتیت و ایلمنیت به همراه نقشه پراکنش آهن، تیتانیم و وانادیم در تیتانومگنتیت.

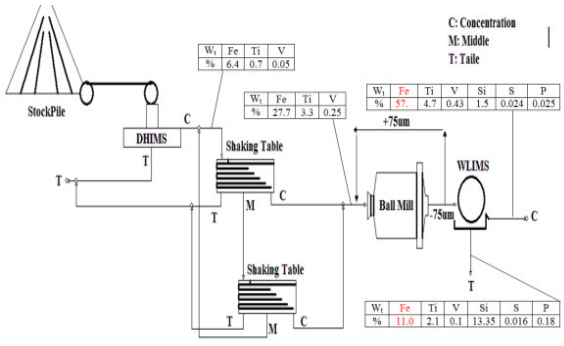
۳-۴- فرآوری کنسانتره سنگ آهن از ماده معدنی پلاسری

براساس نتایج مطالعات کانی‌شناسی انجام شده جهت به‌دست آوردن کنسانتره‌ای با عیار مناسب برای استفاده در فرآیندهای پیرومتالورژی از فرایندهای زیر جهت تغلیظ ماده معدنی بهره گرفته شده است. ابتدا کانه پلاسری با مقدار تقریبی اولیه ۲۰۰۰ کیلوگرم توسط دستگاه مغناطیسی استوانه‌ای خشک شدت بالا (حدود ۱۳۵۰۰ گووس)، تحت جدایش اولیه قرار گرفت تا بدین طریق بخش زیادی از ناخالصی‌های با خاصیت مغناطیسی پایین و یا غیرمغناطیسی از ماده معدنی اولیه جداسازی شوند. در ادامه برای پرعیار سازی آهن موجود در کنسانتره حاصل از روش جداسازی ثقلی توسط دستگاه میز لرزان استفاده شد. کنسانتره به‌دست آمده از این مرحله به عنوان کنسانتره نهایی به مرحله خردایش جهت آزاد سازی کانی‌های آهن‌دار درگیر با کانی‌های غیرمغناطیسی ارسال گردید. شرایط به کار رفته جهت انجام مرحله میز لرزان و خردایش در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵. شرایط به کار رفته جهت جداسازی ثقلی میز لرزان، خردایش در آسیاب گلوله ای و جدایش مغناطیسی.

جداسازی ثقلی		فرایند خردایش		جدایش مغناطیسی شدت پائین	
خوراک ورودی	٤٨٠kg	ظرفیت آسیا	٤ kg	خوراک ورودی	٦١ kg
دبی جرمی	٣٠٠ kg/h	خوراک	٦٥ kg	ابعاد بار ورودی	-٧٥µm
دبی آب	١٤٠٠ lit/h	ابعاد بار ورودی	-١٠ mm	دبی جرمی	١٥٠ gr/min
دامنه نوسان	١٠ mm	درصد جامد	٪٣٥	دبی آب	٧٥٠cc/min
ابعاد بار ورودی	-١٠ mm	زمان خردایش	٤ h	شدت میدان مغناطیسی	٩٠٠ گووس
درصد جامد	٪ ١٨	d_{λ} خردایش	٧٥µm	درصد جامد	٪ ١٧

با توجه به نتایج مطالعات درجه آزادی فرایند خردایش کنسانتره به‌دست آمده از مرحله میز لرزان تا ابعاد زیر ۷۵ میکرون جهت آزادسازی و رسیدن به محدوده دانه‌بندی مناسب برای انجام مرحله بعدی جدایش (مغناطیسی تر شدت پایین) انجام شد. برای مرحله جداسازی مغناطیسی ثانویه از دستگاه جداکننده مغناطیسی تر شدت پایین (حدود ۹۰۰ گووس) و با نوع عملکرد هم جهت با جریان پالپ استفاده گردید. کنسانتره به‌دست آمده از این مرحله به عنوان کنسانتره نهایی درنظر گرفته شد. شرایط به کار رفته جهت انجام جداسازی مغناطیسی ثانویه در جدول (۵) دیده می‌شود. با توجه به فرایندهای انجام شده جهت تغلیظ ترکیبات آهن‌دار در ماده معدنی پلاسری می‌توان مدار فراوری پیشنهادی را مطابق شکل (۸) نمایش داد. جزییات مربوط به عیار آهن در هر یک از مراحل مختلف میانی و پایانی مدار بر روی شکل ارائه شده است.



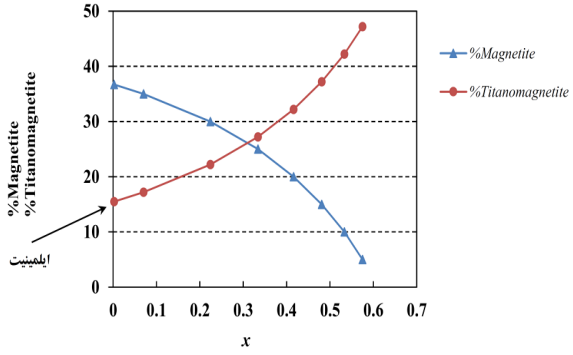
شکل ۸ مدار فرآوری طراحی شده برای ماده معدنی پلاسری مورد مطالعه.

ترکیب شیمیایی و آنالیز عنصری کنسانتره فرآوری شده در این طرح پژوهشی در جدول (۶) آورده شده است:

جدول ۶. آنالیز عنصری XRF از کنسانتره پلاسری فرآوری شده.

ترکیبات	Fe_{tot}	FeO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	TiO_2	V_2O_5	S	P
مقدار درصد وزنی	٥٧/٠	١٨/٧	٣/٢	٣/٤	٢/٥	٠/٨	٧/٩	٠/٧٩	٠/٠٢	٠/٠٢

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در مقایسه با سایر کنسانتره‌های سنگ آهن مصرفی در صنعت یکی از ویژگی‌های مثبت این کنسانتره مقدار گوگرد و فسفر بسیار پایین آن می‌باشد. همچنین به دلیل حضور غالب ترکیبات مگنتیت و تیتانومگنتیت در کانی، درصد آهن دو ظرفیتی در نمونه قابل توجه و برابر ۱۸/۷ درصد است. با توجه به این‌که نتایج مطالعات کانی‌شناسی نشان داده فاز ایلمنیت به صورت تک‌فازی در ریزساختار سنگ مشاهده نشده است لذا با فرض این‌که تمامی ترکیبات تیتانیم در کنار مگنتیت و به صورت فاز تیتانومگنتیت در ماده معدنی وجود داشته باشد در این صورت مجموع آهن دو ظرفیتی موجود در دو فاز مگنتیت و تیتانومگنتیت برابر کل آهن دو ظرفیتی نمونه کنسانتره خواهد بود، به طوری‌که ارتباط بین متغیر اندیس x در ترکیب شیمیایی تیتانومگنتیت و مقدار درصد فاز مگنتیت و یا تیتانومگنتیت را می‌توان ترسیم نمود. این ارتباطها برای کنسانتره مورد نظر با آنالیز شیمیایی ارائه شده در جدول (۶)، در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹. پیش‌بینی مقدار مگنتیت و تیتانومگنتیت موجود در کنسانتره، برای x های مختلف در ترکیب شیمیایی تیتانومگنتیت.

همان‌طور که بر روی نمودار شکل (۹) ملاحظه می‌شود در صورتی که مقدار x برابر صفر باشد این موضوع بدین معنی است که تمامی تیتانیم در ترکیب به صورت فاز ایلمینیت ظاهر گردید ولی هم‌چنان که قبلاً نیز اشاره شد مطالعات صورت گرفته بر روی کانی حاکی از این است که ایلمینیت همواره در کنار مگنتیت و به شکل تیتانومگنتیت می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به درصد TiO_2 و FeO در نمونه کنسانتره، متغیر x نمی‌تواند مقادیر بالا را اختیار کند زیرا در این‌صورت بایستی مقدار مگنتیت آزاد در نمونه معدنی بسیار پایین باشد در صورتی که مطالعات کانی‌شناسی (آنالیز فازی و بررسی‌های مقطع صیقلی) حاکی از حضور قالب مگنتیت در نمونه معدنی است. با این توصیف پیش‌بینی می‌شود مقدار x در حدود ۰/۱ باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این طرح، جداسازی کانی‌های آهن‌دار از کانه پلاسری مورد بررسی قرار گرفته و مدار فرآوری جهت تغلیظ آهن، تیتانیم و وانادیم پیشنهاد گردیده است. مراحل جداسازی درنظر گرفته شده به صورت جداسازی مغناطیسی اولیه خشک شدت بالا، میز لرزان، خردایش و جداسازی مغناطیسی ثانویه تر شدت پایین درنظر گرفته شده است. با توجه به این‌که بیشترین سهم کانه پلاسری مربوط به کانی‌های تیتانومگنتیتی می‌باشد و کانی‌های هماتیت به عنوان یک کانی آهن‌دار فرعی در ماده معدنی حضور دارد لذا در طی این مراحل جداسازی بخش زیادی از آهن به صورت تیتانومگنتیتی از کانه پلاسری جدا گردید و بخش کمی از آهن به صورت هماتیتی به باطله راه یافت. در نتیجه کنسانتره نهایی به دست آمده طی این مدار تغلیظ حاوی ۵۷ ٪ آهن با بازیابی وزنی ۱/۵ ٪ بوده که قابل ارائه به صنعت ذوب و فولاد کشور می‌باشد. همچنین به دلیل درگیری کانی‌های تیتانیم دار و وانادیم‌دار در داخل مگنتیت (تیتانومگنتیت‌ها) عیار به دست آمده از تیتانیم و وانادیم نیز جهت انجام فرآیندهای ذوب و جداسازی برای استخراج و خالص‌سازی این فلز با ارزش مناسب می‌باشد. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داده با توجه به نوع درگیری ترکیبات تیتانیم و وانادیم همراه با مگنتیت، عیار مناسبی از تیتانیم و وانادیم نیز در کنسانتره سنگ آهن نهایی نیز حاصل شده است به‌طوری‌که استحصال این عناصر از کنسانتره فرآوری شده در طی فرایندهای تولید آهن و فولاد (گندله‌سازی و فولادسازی) توجیه اقتصادی خواهد داشت.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر مستخرج از طرح پژوهشی است که با پیشنهاد و حمایت مالی شرکت معدنی و صنعتی فولاد سنگ مبارکه اصفهان به انجام رسیده، لذا لازم است از مساعدت‌ها و حمایت‌های مدیریت محترم عامل و اعضای هیأت مدیره شرکت و همچنین از همفکری و همکاری مدیران و کارشناسان شرکت که ما را در اجرای طرح یاری نمودند تشکر و قدردانی به عمل آید.

مراجع

1. Chen, D.S. , Song, B. , Wang, L. , Wang, W.J. ,"Solid state reduction of panzhihua titanomagnetite concentrates with pulverized coal", *Mineral Engineering*, 2011, 24, 864-869.
2. Habashi, F. "Handbook of Extractive Metallurgy", 1998, Wiley-VCH.
3. Udy, M.C. , Manson, W.S. , "Electric smelting of magnetite from savage river", *Dressing Investigations*, 2004, 207-226.
4. Gupta, C. K. , Krishnamurthy, N. , "Extractive Metallurgy of Vanadium", 1992, India, Elsevier, Bhabba Atomic Research Center, Metallurgy Division.
5. Dmitriev, A.N. , Mukhitdinov, Y.S. , Rakhimov, V.R. Sitdikov, F. G. ,"Pyrometallurgical technology for processing titanomagnetites from the TEBINBULAK deposit, *Mettallurgist*, 2005, 49,1-2.
6. Moskalyk, P. R. , Alfantazi, A. M. ,"Processing of vanadium: review", *Minerals engineering*, 16, 2003, 793-805.
۷. فرآوری سنگ آهن پلاسری سنگان در مقیاس آزمایشگاهی، برای تولید کنسانتره قابل باردهی به گندله‌سازی، نعیمه غفوری توران، دانشگاه تهران، کارشناسی ارشد مهندسی معدن- فرآوری مواد معدنی-۱۳۸۸.

8. Dmitriev, A. N. , Mukhitdinov, Ya. S. , Rakhimov, V. R. Sitdikov, F. G. “Pyrometallurgical technology for processing titanomagnetites from the TEBINBULAK deposit”, *Mettallurgist*, 49, 2005, 1-2.
9. Sadykhov, G. B. , Olyunina, K. V. , Goncharenko, T. V. “Phase Composition of the Vanadium-Containing titanium slags forming upon the reduction smelting of the titanomagnetite concentrate from the Kuranakhsh deposit”, *Russian Metallurgy (Metally)*, 7, 2010, 581-587.
10. Roshchin, V.E. , Asanov, A. V. , Roshchin, V. R. “Soild-phase prereduction of iron-vanadium concentrates and liquid-phase separation of the products of their reduction”, *Russian Metallurgy (Metally)*, 11, 2010, 1001-1008.
11. Hukkanen, E. Walden, H. , “The production of vanadium and steel from titanomagnetites”, *International Journal of Mineral processing,* 15, 1985, 89-102.
12. Jena, B. C. , Dresler, W. , Reilly, I. G. , “Extraction of titanium, vanadium and iron from titanomagnetite deposits at pipestone lake, Manitoba, Canada”, *Minerals engineering*, 8, 1995, 159-168.