فصل دوم

روش‌های استخراج فلزات

هدف‌های رفتاری : با یادگیری این فصل هنرجو می‌تواند :

۱ــ فرآیندهای استخراج فلزات متداول صنعتی را نام ببرد.

۲ــ مراحل فرآیند استخراج فلزات را نام ببرد.

۳ــ مراحل آماده سازی سنگ آهن را شرح دهد.

۴ــ فرآیند احیاء سنگ آهن از طریق کوره بلند را توضیح دهد.

۵ــ محصولات کوره بلند را نام ببرد.

۶ــ فرآیند تولید آهن به روش احیاء مستقیم را توضیح دهد.

۷ــ محصولات نیم‌ساخته کارخانه‌های فولادسازی را نام ببرد.

۸ــ استخراج فلزات به روش‌تر (هیدرومتالورژی) را شرح دهد.

۱ــ۲ــ آشنایی با فرآیندهای استخراج فلزات

به‌طور معمول عناصر فلزی در طبیعت به صورت خالص یافت نمی‌شوند، بلکه به صورت ترکیبات با عناصر دیگر در پوستهٔ زمین وجود دارند و نوع ترکیبات بستگی به مواد در تماس با عناصر فلزی و دمای محیط واکنش دارد.

به طور کلی در معادن موجود در سطح زمین بیشتر کانی‌های فلزی به صورت ترکیبات اکسیدی وجود دارند و در سطوح پایین‌تر سطح زمین ترکیبات سولفیدی بخش عمده این کانی‌ها را به خود اختصاص می‌دهند. شکل (۱ــ۲) نمای یک معدن آهن را در سطح زمین نشان می‌دهد.

شکل ۱ــ۲ــ نمایی از معدن سنگ آهن در سطح زمین

در این فصل مراحل استخراج عناصر فلزی بر اساس دو روش پیرومتالورژی (متالورژی حرارتی) و هیدرومتالورژی (متالورژی‌تر) به‌صورت مختصر مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲ــ۲ــ استخراج آهن

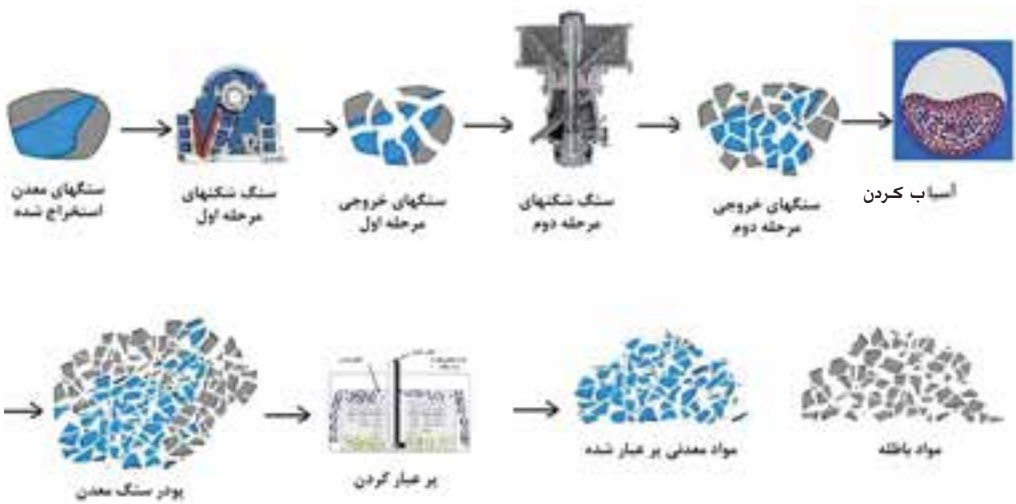
سنگ معدن آهن متشکل از کانی‌های متفاوت محتوی آهن می‌باشد که در جدول (۱ــ۲) مهم‌ترین آنها ذکر گردیده است این کانی‌ها همراه با ناخالصی‌های مختلف مثل : اکسید سیلیسیم، کربنات کلسیم، گوگرد، منگنز، ترکیبات فسفردار و غیره وجود دارند. سنگ‌های محتوی کانی آهن پس از استخراج از معدن تا مرحله انتقال به کوره احیاء باید از نظر شرایط فیزیکی، دانه‌بندی و نیز زدودن بخش عمده‌ای از ناخالصی‌ها آماده شوند. لازم به ذکر است که ارزش سنگ معدن آهن بر اساس درصد کانی آهن موجود در آن و ترکیب مواد باطله همراه تعیین می‌شود.

جدول ۱ــ۲ــ کانی‌های اصلی محتوی آهن در معادن سنگ آهن

نام کانی آهن	فرمول شیمیایی	حدود درصد آهن در کانی
ماگنتیت	Fe_3O_4	۷۲
هماتیت	Fe_2O_3	۷
لیمونیت	$FeO(OH)$	۶۲
سیدریت	$FeCO_3$	۴۸

توجه : سنگ معدن آهن مصرفی در کارخانه‌های فولادسازی ذوب آهن و فولاد مبارکه اصفهان به‌طور عمده مخلوطی از کانی‌های ماگنتیت و هماتیت است که از مرغوب ترین نوع سنگ معدن آهن به حساب می آید واز معادن چغارت واقع در ۱۴ کیلومتری شمال شرقی شهر بافق استان یزد استخراج می شود.

۱ــ۲ــ۲ــ آماده‌سازی سنگ آهن : آماده‌سازی سنگ آهن اولین مرحله از فرآیند استخراج آهن می‌باشد که درچند مرحله صورت می‌گیرد. شکل(۲ــ۲) مراحل جداسازی مواد باطله و پرعیار کردن سنگ آهن را نشان می‌دهد.



شکل ۲ــ۲ــ روند عمومی استخراج و پرعیارسازی سنگ‌های معدنی

الف) غربال کردن : با توجه به اینکه در مرحله استخراج، سنگ‌های معدنی با ابعاد و اندازه‌های متفاوتی به‌دست می‌آیند بنابراین در اولین مرحله لازم است سنگ‌های درشت جهت خرد شدن جدا شوند که به این جداسازی فیزیکی برحسب ابعاد سنگ، غربال کردن می‌گویند. (شکل ۳ــ۲) تجهیزات مربوط به غربال کردن مواد معدنی را نشان می‌دهد.

شکل ۳ــ۲ــ غربال سنگ معدن

ب) خرد کردن : سنگ‌های معدنی باید جهت اجرای عملیات تغلیظ و افزایش عیار، خرد شده و به‌صورت پودر درآیند. این کار برحسب جنس سنگ و درجه سختی آنها طی چندین مرحله توسط سنگ شکن‌ها و سپس آسیاب کردن صورت می گیرد. سنگ شکن‌ها دارای انواع مختلفی می‌باشند که در شکل (۴ــ۲) دو نمونه از این دستگاه‌ها نمایش داده شده‌اند.

شکل ۴ــ۲ــ دستگاه‌های سنگ‌شکن

ج) برعیار کردن مواد معدنی : در این مرحله هدف افزایش درصد کانی‌های محتوی آن در ماده معدنی خرد شده از طریق جداکردن مواد باطله و ناخالصی است که به روش‌های مختلفی صورت

می‌گیرد. در خصوص سنگ آهن یکی از روش‌های بسیار متداول استفاده از میدان مغناطیسی است. در این روش کانی‌های مغناطیس شونده آهن جذب میدان الکترومغناطیس شده و از مواد غیرمغناطیس جدا می‌شوند. این موضوع در شکل (۵ــ۲) نشان داده شده است.

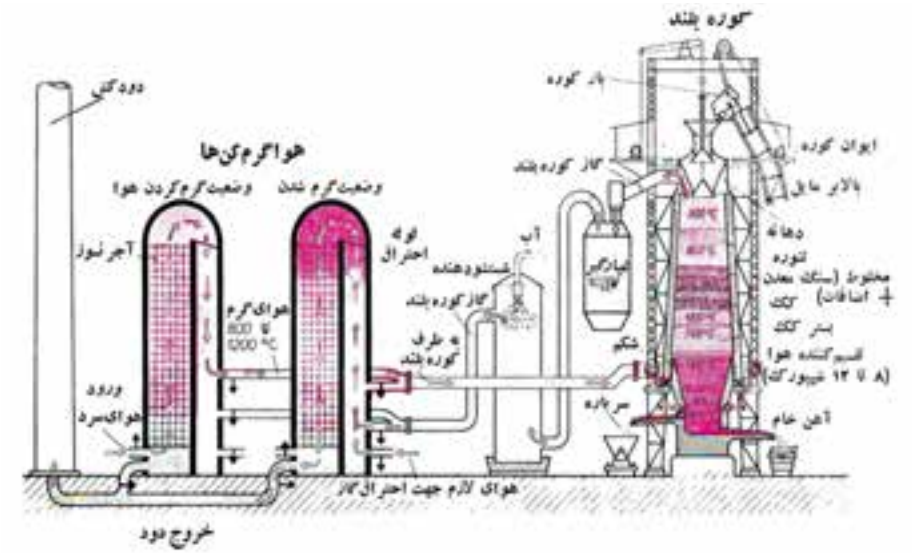
شکل ۵ــ۲ــ جداسازی کانی‌های فرومغناطیس آهن از مواد باطله

د) احیاء: مواد معدنی پرعیار شده نسبت به کانی‌های محتوی آهن پس از انتقال به کارخانه‌های فولادسازی به‌طور معمول به یکی از دو روش زیر احیاء می شود.

۱ــ احیاء از طریق کوره بلند (احیاء غیرمستقیم)

۲ــ احیاء به روش مستقیم

۲ــ۲ــ۲ــ فرآیند اِحیاء سنگ آهن از طریق کوره بلند :شکل (۶ــ۲) نمایی از کوره بلند و تجهیزات جانبی آن را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می شود سنگ آهن پرعیار شده با



شکل ۶ــ۲ــ مراحل انجام اِحیاء سنگ آهن از طریق کوره بلند

نسبت‌های معینی کک و آهک ($CaCO_3$)[1] مخلوط می‌شود و از قسمت فوقانی کوره بلند به صورت یکنواخت وارد آن می‌شوند. مراحل احیاء سنگ آهن در کوره بلند را می‌توان مطابق شکل(۷ــ۲) به چهار منطقه به شرح زیر تقسیم کرد. در کارخانه ذوب آهن اصفهان فرآیند احیاءِ سنگ آهن به این روش صورت می گیرد.

شکل ۷ــ۲ــ کوره بلند احیاء آهن در شرکت ذوب آهن اصفهان

الف) منطقه خشک کردن (منطقه گرم‌کننده) : این قسمت که در ناحیه فوقانی قرار دارد در اثر عبور گازهای داغ از لابلای مواد ورودی به کوره رطوبت آنها تبخیر می شود.

ب) منطقه احیاء : در این منطقه با افزایش دما، واکنش بین کانی‌های اکسید آهن و ماده احیاءکننده که بیشتر مونوکسید کربن (CO) است شروع می شود. واکنش‌های این منطقه را می‌توان بصورت ذیل نوشت.

$$3Fe_2O_3 \quad CO \rightarrow 2Fe_3O_4 \quad CO_2\uparrow$$
$$Fe_3O_4 \quad CO \rightarrow 3FeO \quad CO_2\uparrow$$
$$FeO \quad CO \rightarrow Fe \quad CO_2\uparrow$$

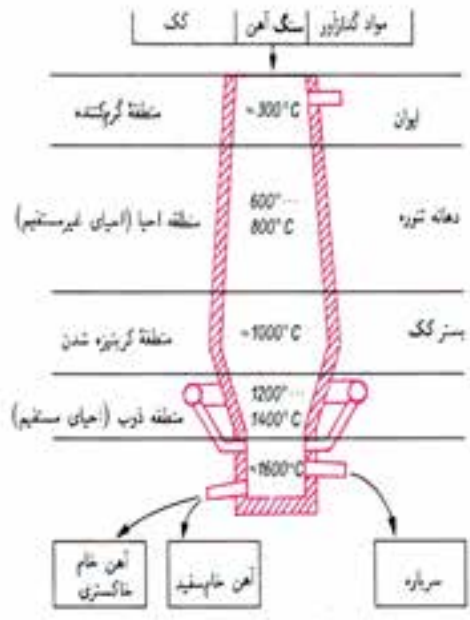
ج) منطقه کربنیزه شدن : در این منطقه که دما به حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد می رسد قسمتی از آهن احیاء شده ضمن حرکت به سمت پایین کوره با کک گداخته واکنش داده و ترکیب کاربید آهن حاصل می شود.

$$3Fe \quad C \rightarrow Fe_3C$$

د) منطقه ذوب : در ناحیه نزدیک به انتهای کوره که دما به حدود ۱۴۰۰ــ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد می‌رسد، باقی‌مانده اکسید آهن احیاء می‌شود؛ ضمن اینکه واکنش آهن با کربن نیز صورت می گیرد.

$$FeO \quad C \rightarrow Fe \quad CO\uparrow$$
$$Fe \quad C \rightarrow Fe_3C$$

۱ــ آهک به‌عنوان ماده کمک ذوب و سرباره‌ساز به کوره اضافه می‌شود که به حذف ناخالصی‌ها از مذاب کمک می کند.



شکل ۸ــ۲ــ نمایش شماتیک کوره احیاء و قسمت‌های اصلی آن

محصولات کوره بلند : محصول اصلی خارج شده از کوره بلند آهن خام نام دارد که دارای ۳ تا ۴ درصد کربن به اضافه عناصر ناخالصی مثل : سیلیسیم، منگنز، فسفر و گوگرد است که برحسب مقدار عناصر همراه دو نوع آهن خام از کوره خارج می‌شود.

ــ **آهن خام سفید** : محتوی ۳/۵ تا ۴ درصد کربن، ۰/۱ تا ۰/۲ درصد سیلیسیم، ۱ تا ۴ درصد منگنز، حدود ۰/۳ درصد فسفر و ۰/۰۴ درصد گوگرد است.

ــ **آهن خام خاکستری** : محتوی ۳/۵ تا ۴ درصد کربن، ۱/۵ تا ۳ درصد سیلیسیم، حدود ۱ درصد منگنز، ۰/۳ تا ۲ درصد فسفر و ۰/۰۶ درصد گوگرد است.

۳ــ۲ــ۲ــ تولید آهن خام به روش احیاء مستقیم : در این فرآیند ابتدا مواد نرمه محتوی اکسید آهن پس از اضافه کردن مقدار کمی‌آب،آهک و مواد افزودنی دیگر به‌وسیله سینی‌های بزرگ دوار به صورت گلوله‌های کوچکی تبدیل می‌شوند که گندوله نامیده می‌شوند (شکل ۹ــ۲). در واحد احیاء گندوله‌ها از قسمت فوقانی وارد کوره‌های احیاء می‌شوند. در این فرآیند به‌جای زغال سنگ (کک) از گاز طبیعی برای احیاء کانی‌های اکسید آهن استفاده می‌شود. عملیات احیاء بدون ذوب شدن سنگ آهن (گندوله‌ها) صورت می‌گیرد و از انتهای کوره، آهن

اسفنجی با ۹۲ تا ۹۶ درصد آهن خارج می‌شود. در این روش علاوه بر افزایش سرعت تولید، هزینه‌ها و تأسیسات جانبی کاهش می‌یابد. ضمن اینکه آلودگی‌های زیست محیطی و مصرف انرژی نیز کاهش می‌یابد. از این فرآیند در شرکت فولاد مبارکه اصفهان استفاده می شود که تجهیزات مربوط به واحد احیاء مستقیم این واحد فولادسازی در شکل (۱۰ــ۲) مشاهده می‌شود.

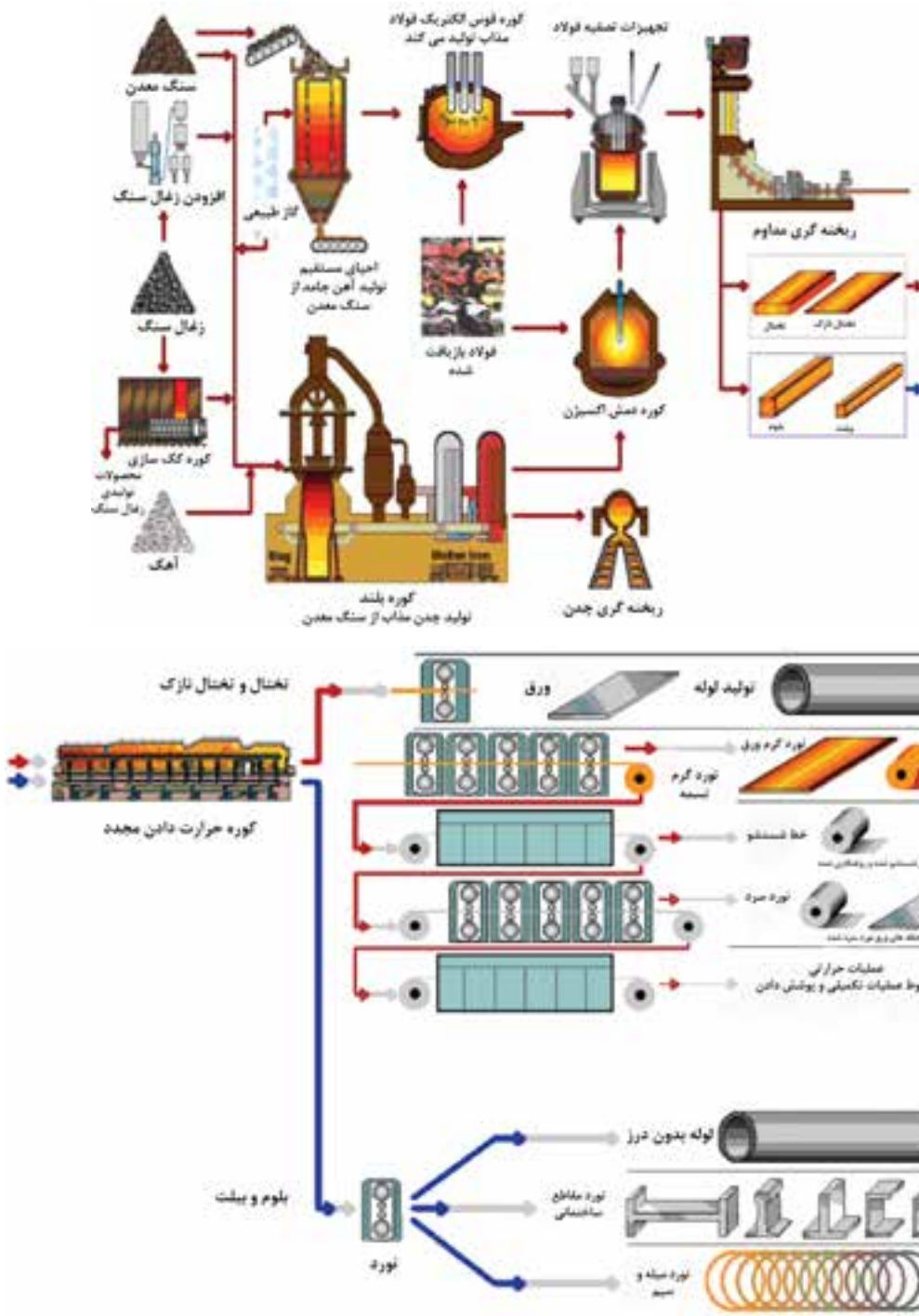
شکل ۱۰ــ۲ــ نمایی از کوره‌های احیاء مستقیم مجتمع فولاد مبارکه اصفهان

۳ــ۲ــ تولید فولاد از آهن خام

محصول خارج شده از کوره‌های احیاء سنگ آهن (به‌صورت مستقیم یا کوره بلند) دارای مقدار زیادی کربن و عناصر ناخواسته و مضر دیگر نظیر گوگرد و فسفر می‌باشد. چنین آلیاژی قابلیت شکل پذیری، چکش خواری و جوشکاری ندارد. بنابراین لازم است عناصر اضافی و مزاحم به حد مناسبی کاهش یابند.

اساس روش‌های کاهش عناصر اضافه و مزاحم، دمیدن اکسیژن به مذاب آهن خام و سوختن عناصر مزاحم موجود در مذاب تا حد قابل قبول است. هر چند این فرآیند در طول زمان از نظر سرعت، کارآیی و کم کردن هزینه پیشرفت نموده ولی اساس آن تغییر نکرده است.

در شکل (۱۱ــ۲) مراحل احیاء سنگ آهن به‌روش مستقیم، تصفیه و فولادسازی، ریخته‌گری و نورد محصولات نیم ساخته جهت تولید ورق و انواع پروفیل‌های فولادی به‌طور شماتیک نشان داده شده است.



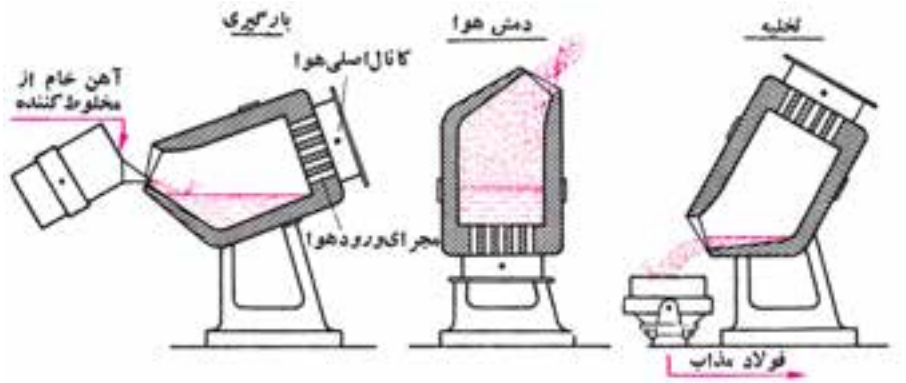
شکل ۱۱ــ۲ــ مراحل استخراج آهن از سنگ معدن، فولادسازی و تولید محصولات از نیم ساخته‌های فولادی

عملیات تصفیه مذاب آهن خام و فولادسازی به‌طور عمده توسط یکی از روش‌های زیر صورت می‌گیرد :

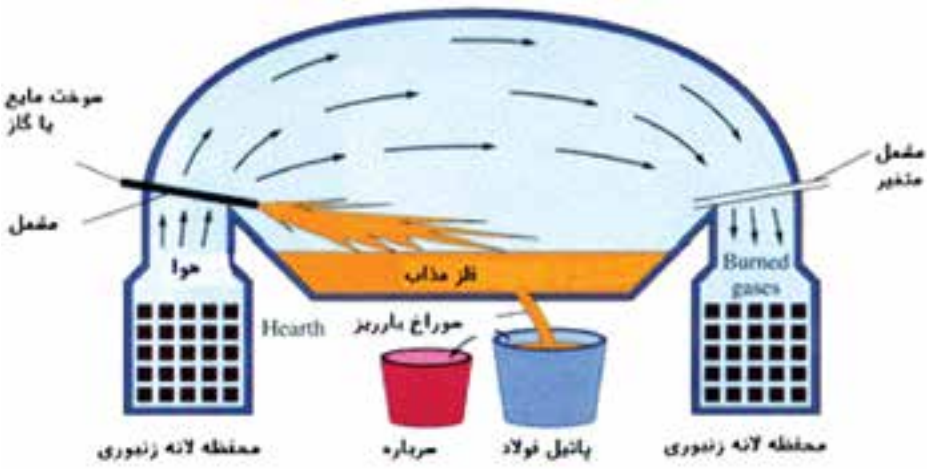
۱ــ روش توماس ــ بسمر

۲ــ روش زیمنس ــ مارتین

۳ــ روش کوره قوس الکتریکی

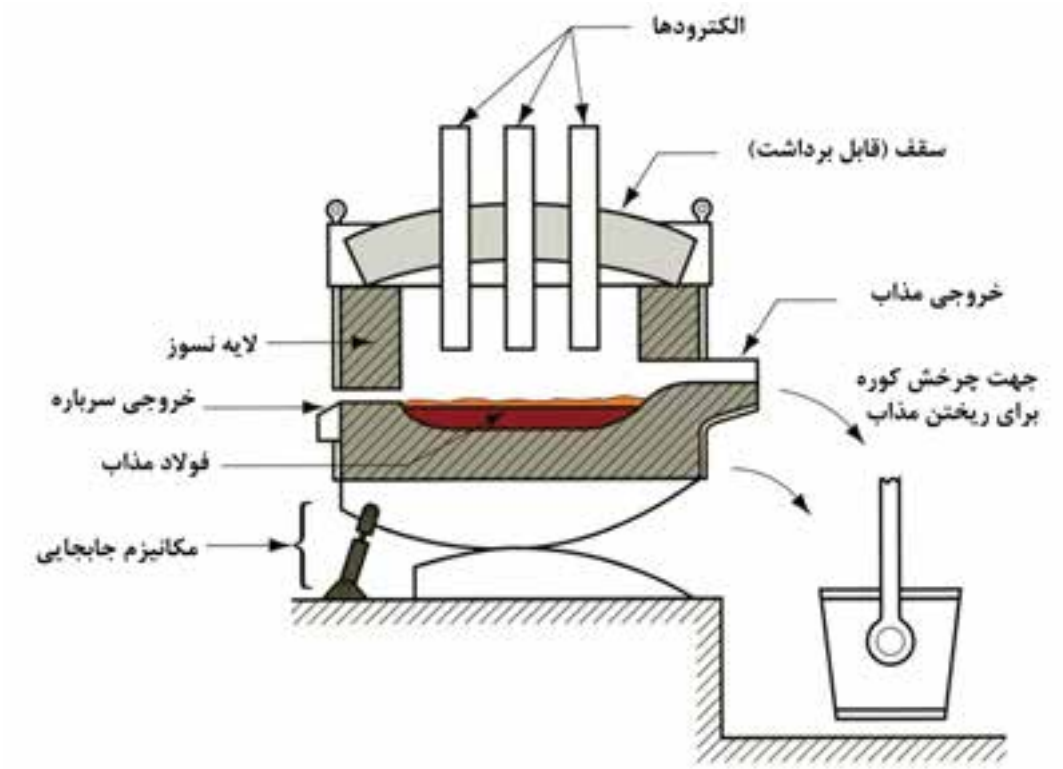


شکل ۱۲ــ۲ــ تولید فولاد به روش توماس ــ بسمر که در واحدهای قدیمی صورت می‌گیرد



شکل ۱۳ــ۲ــ کوره زیمنس ــ مارتین که نسبت به روش توماس جدیدتر است.

فولادسازی درکوره‌های قوس الکتریکی یکی از روش‌های جدید متداول و مدرن فولادسازی به‌شمار می‌رود شکل(۱۴ــ۲).

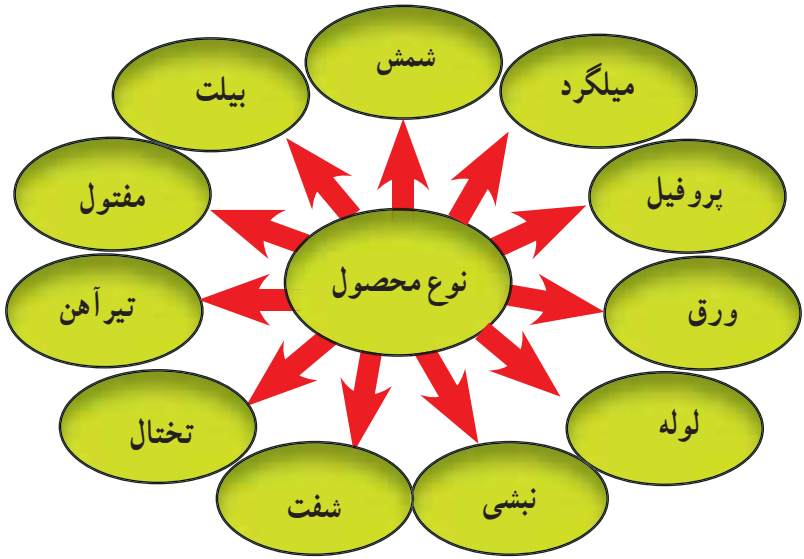


شکل ۱۴ــ۲ــ کوره قوس الکتریکی

در هر یک از فرآیندهای فولادسازی پس از تصفیه مذاب آهن خام و رساندن مقدار عناصر مضر یا اضافی به حد مطلوب، عناصر آلیاژی موردنظر را به مذاب اضافه می‌کنند و اقدام به کار تولید فولاد آلیاژی می‌نمایند.

۴ــ۲ــ تولید محصولات فولادی

همان‌طور که در شکل (۱۱ــ۲) ملاحظه گردید، مذاب آهن پس از تصفیه و رسیدن به ترکیب آلیاژی از پیش تعیین شده به کمک روش‌های ریخته‌گری و شکل دهی به صورت نیم ساخته فلزی یا محصول نهایی به بازار عرضه می‌شوند. در نمودار (۱ــ۲) و شکل (۱۵ــ۲) محصولات متداول شرکت‌های فولادسازی نشان داده شده است.



نمودار ۱ــ۲ــ محصولات متداول شرکت‌های فولادسازی

شکل ۱۵ــ۲ــ انواع متداول محصولات کارخانه‌های فولادسازی

۵ــ۲ــ استخراج فلزات به روش تر یا هیدرومتالورژی

فرآیندی که در آن از کوره‌های مختلف برای احیاء کانی‌های محتوی ترکیبات اکسیدی فلزات استفاده می‌گردد نظیر آنچه در فرآیند استخراج آهن ملاحظه شد در اصطلاح روش پیرومتالورژی یا متالورژی حرارتی نامیده می‌شود. روش هیدرومتالورژی نسبت به روش پیرومتالورژی مقرون به صرفه‌تر بوده و میزان مصرف انرژی و نیز آلودگی محیط زیست در آن کمتر می‌باشد. این روش برمبنای انحلال شیمیایی عناصر از کانی‌های معدنی و سپس رسوب کاتیون‌های فلز مورد نظر از محلول با استفاده از جریان الکتریکی انجام می‌شود. به‌طور معمول استخراج به روش‌تر بیشتر برای استخراج فلزات غیر آهنی به‌کار می‌رود. در حال حاضر در مجتمع مس سرچشمه برای استخراج مس و کارخانه سرب و روی زنجان برای استخراج روی از این روش استفاده می‌شود.

۱ــ ۵ ــ۲ــ مراحل استخراج فلز به روش هیدرومتالورژی : در شکل (۱۶ــ۲) مراحل مختلف فرآیند استخراج فلز مس به روش هیدرومتالورژی نشان داده شده است. این مراحل را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد :

۱ــ استخراج سنگ از معدن و انتقال آنها به محل مناسب

۲ــ تزریق حلال مناسب جهت حل کردن عنصر فلزی مورد نظر از ترکیب سنگ معدن

۳ــ جمع‌آوری محلول محتوی کاتیون[1]های عنصر مورد نظر

۴ــ انتقال محلول جمع آوری شده به حوضچه‌هایی جهت رسوب ذرات جامد موجود در محلول و مواد مزاحم دیگر

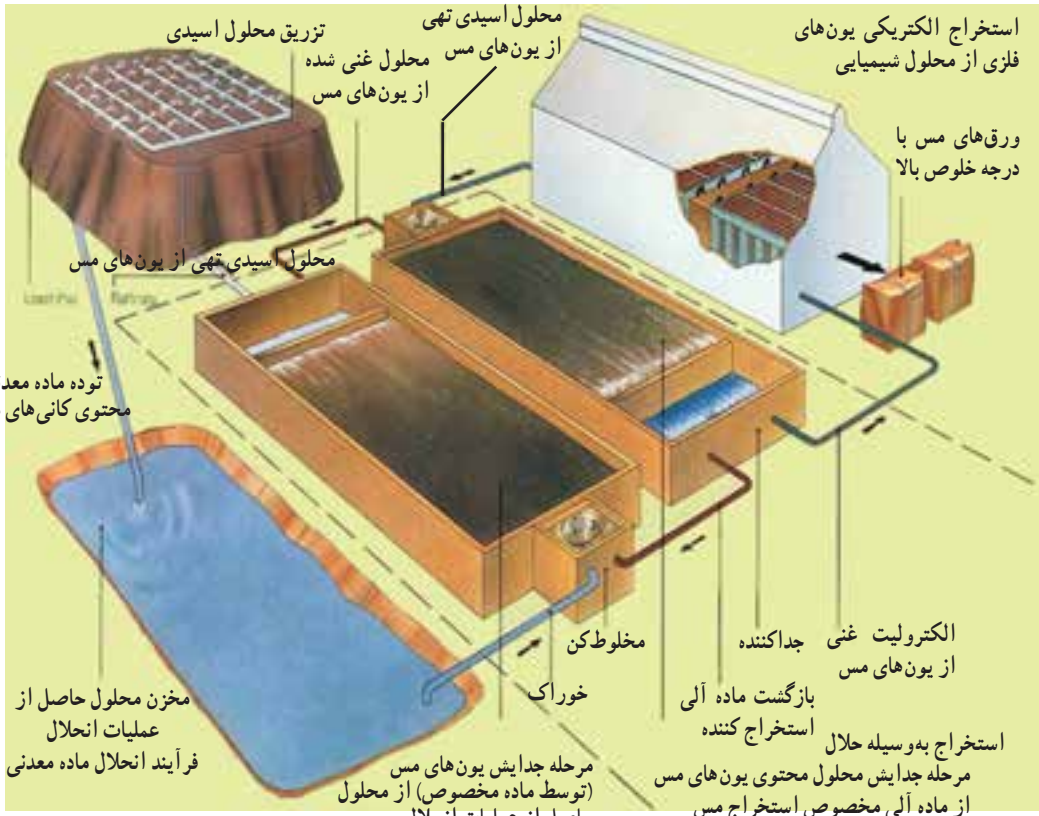
۵ــ افزایش عیار محلول نسبت به یون فلز مورد نظر با استفاده از مواد شیمیایی مناسب

۶ــ انتقال محلول پرعیار شده به سل‌های الکتروونینگ[2] و رسوب کاتیون‌های فلز مورد نظر با استفاده از جریان الکتریکی روی سطح الکترودهای کاتد

۷ــ جمع‌آوری ورق‌های کاتدی پس از تشکیل رسوب فلزی (شکل ۱۷ــ۲) و تکرار سیکل فوق

۱ــ به یون‌های با بار مثبت کاتیون می‌گویند.

۲ــ الکتروونینگ یا بازیابی الکتریکی به معنای استخراج فلز از محلول آبی محتوی یون فلز با استفاده از جریان الکتریکی می‌باشد.



شکل ۱۶ــ۲ــ مراحل استخراج فلز مس به روش هیدرومتالورژی

شکل ۱۷ــ۲ــ ورق‌های مسی تولید شده در کارخانه الکتروونینگ مجتمع مس سرچشمه

آزمون پایانی

۱ــ مراحل آماده‌سازی سنگ آهن را نام برده و به‌صورت مختصر توضیح دهید.

۲ــ روش‌های احیای سنگ آهن را نام برده و تفاوت آنها را ذکر نمایید.

۳ــ یک کوره بلند ترسیم نمایید و مناطق مختلف آن را نام ببرید.

۴ــ مزایای روش احیای مستقیم نسبت به روش احیا از طریق کوره بلند چیست؟

۵ــ انواع نیم‌ساخته‌های فولادی را نام ببرید. (۴ مورد)

۶ــ تفاوت روش پیرو متالورژی و هیدرومتالورژی چیست؟

۷ــ برحسب مقدار عناصر همراه ناخالصی چند نوع آهن خام را که از کوره بلند خارج می‌شود؟ نام ببرید.

۸ــ کدام‌یک سنگ معدن آهن نیست؟

الف) کالکوسیت ب) هماتیت ج) ماگنتیت د) سیدریت

۹ــ برای احیای سنگ آهن در کارخانه‌های فولادسازی شرکت‌های فولاد مبارکه و ذوب آهن اصفهان به ترتیب از کدام روش استفاده می‌شود؟

الف) فولاد مبارکه به‌روش کوره بلند و ذوب آهن به روش احیای مستقیم

ب) هر دو به روش کوره بلند

ج) فولاد مبارکه به روش احیای مستقیم و ذوب آهن به روش کوره بلند

د) هر دو به روش احیای مستقیم

۱۰ــ اساس کاهش عناصر ناخالصی در مذاب آهن خام چیست؟

الف) دمش هیدروژن ب) دمش اکسیژن

ج) دمش آرگون د) دمش نیتروژن