

# فصل دوم

## روش‌های استخراج فلزات



**هدف‌های رفتاری :** با یادگیری این فصل هنرجو می‌تواند :

- ۱- فرآیندهای استخراج فلزات متداول صنعتی را نام ببرد.
- ۲- مراحل فرآیند استخراج فلزات را نام ببرد.
- ۳- مراحل آماده‌سازی سنگ آهن را شرح دهد.
- ۴- فرآیند احیاء سنگ آهن از طریق کوره بلند را توضیح دهد.
- ۵- محصولات کوره بلند را نام ببرد.
- ۶- فرآیند تولید آهن به روش احیاء مستقیم را توضیح دهد.
- ۷- محصولات نیم‌ساخته کارخانه‌های فولادسازی را نام ببرد.
- ۸- استخراج فلزات به روش تر (هیدرومتالورژی) را شرح دهد.

## ۲-۱- آشنایی با فرآیندهای استخراج فلزات

به طور معمول عناصر فلزی در طبیعت به صورت خالص یافت نمی شوند، بلکه به صورت ترکیبات با عناصر دیگر در پوسته 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 کانی های فلزی به صورت ترکیبات اکسیدی وجود دارند و در سطوح پایین تر سطح زمین ترکیبات سولفیدی بخش عمده این کانی ها را به خود اختصاص می دهند. شکل (۲-۱) نمای یک معدن آهن را در سطح زمین نشان می دهد.



شکل ۲-۱- نمایی از معدن سنگ آهن در سطح زمین

در این فصل مراحل استخراج عناصر فلزی بر اساس دو روش پیرومتالورژی (متالورژی حرارتی) و هیدرومتالورژی (متالورژی تر) به صورت مختصر مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

## ۲-۲- استخراج آهن

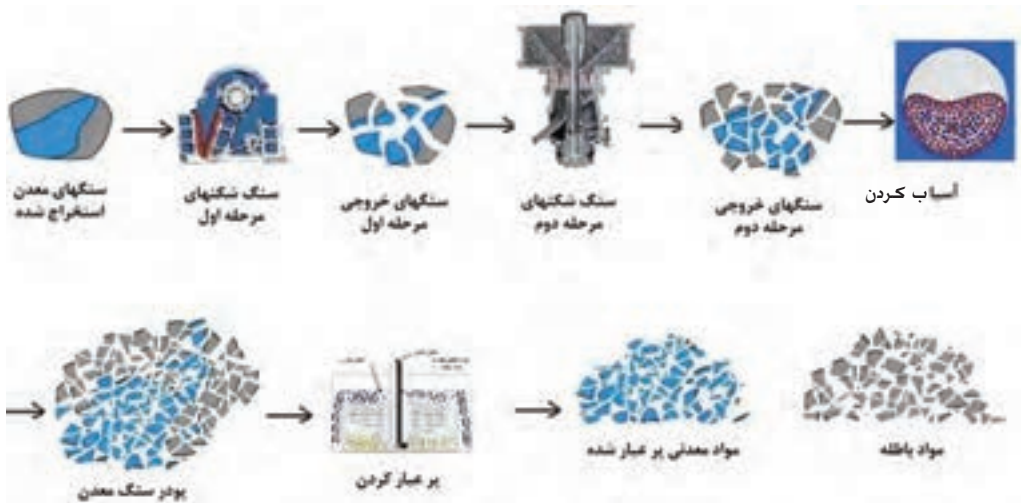
سنگ معدن آهن متشکل از کانی های متفاوت محتوی آهن می باشد که در جدول (۲-۱) مهم ترین آنها ذکر گردیده است این کانی ها همراه با ناخالصی های مختلف مثل : اکسید سیلیسیم، کربنات کلسیم، گوگرد، منگنز، ترکیبات فسفردار و غیره وجود دارند. سنگ های محتوی کانی آهن پس از استخراج از معدن تا مرحله انتقال به کوره احیاء باید از نظر شرایط فیزیکی، دانه بندی و نیز زدودن بخش عمده ای از ناخالصی ها 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 می شود.

جدول ۱-۲- کانی‌های اصلی محتوی آهن در معادن سنگ آهن

نام کانی آهن	فرمول شیمیایی	حدود درصد آهن در کانی
ماگنتیت	$Fe_3O_4$	۷۲
هماتیت	$Fe_2O_3$	۷۰
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 مرغوب‌ترین نوع سنگ معدن آهن به حساب می‌آید و از معادن چغارت واقع در ۱۴ کیلومتری شمال شرقی شهر بافق استان یزد استخراج می‌شود.

۱-۲-۲- آماده‌سازی سنگ آهن: آماده‌سازی سنگ آهن اولین مرحله از فرآیند استخراج آهن می‌باشد که در چند مرحله صورت می‌گیرد. شکل (۲-۲) مراحل جداسازی مواد باطله و برعیار کردن سنگ آهن را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲- روند عمومی استخراج و برعیارسازی سنگ‌های معدنی



**الف) غربال کردن:** با توجه به اینکه در مرحله استخراج، سنگ‌های معدنی با ابعاد و اندازه‌های متفاوتی به دست 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 ۳-۲) تجهیزات مربوط به غربال کردن مواد معدنی را نشان می‌دهد.

شکل ۳-۲- غربال سنگ معدن

**ب) خرد کردن:** سنگ‌های معدنی باید جهت اجرای عملیات تغلیظ و افزایش عیار، خرد شده و به صورت پودر درآیند. این کار برحسب جنس سنگ و درجه سختی آنها طی چندین مرحله توسط سنگ شکن‌ها و سپس آسیاب کردن صورت می‌گیرد. سنگ شکن‌ها دارای انواع مختلفی می‌باشند که در شکل (۴-۲) دو نمونه از این دستگاه‌ها نمایش داده شده‌اند.



شکل ۴-۲- دستگاه‌های سنگ‌شکن

**ج) پرعیار کردن مواد معدنی:** در این مرحله هدف افزایش درصد کانی‌های محتوی آن در ماده معدنی خرد شده از طریق جدا کردن 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 مغناطیس‌شونده آهن جذب میدان الکترومغناطیس شده و از مواد غیرمغناطیس جدا می‌شوند. این موضوع در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.



شکل ۲-۵- جداسازی کانی‌های فرومغناطیس آهن از مواد باطله

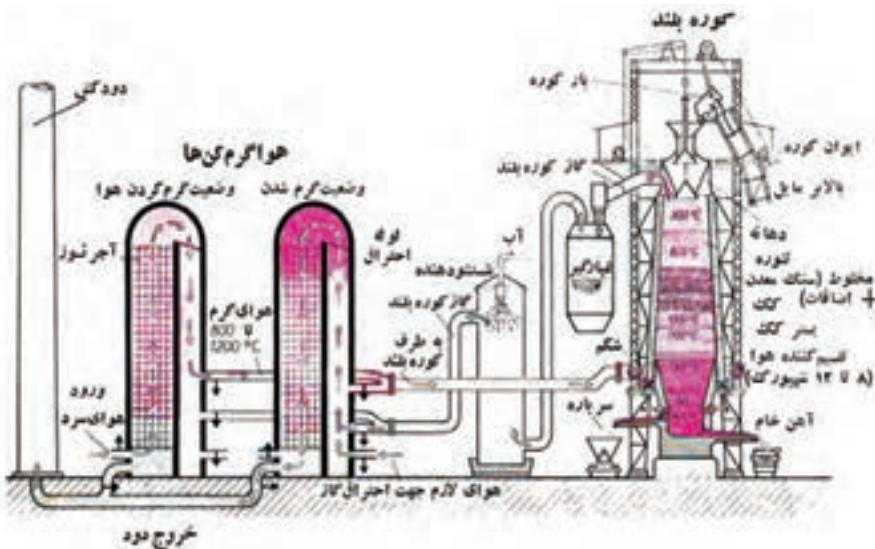
د/ احیاء: مواد معدنی پرعیار شده نسبت به کانی‌های محتوی آهن پس از انتقال به کارخانه‌های فولادسازی به‌طور معمول به یکی از دو روش زیر احیاء می‌شود.

۱- احیاء از طریق کوره بلند (احیاء غیرمستقیم)

۲- احیاء به روش مستقیم

۲-۲-۲- فرآیند احیاء سنگ آهن از طریق کوره بلند: شکل (۲-۶) نمایی از کوره

بلند و تجهیزات جانبی آن را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سنگ آهن پرعیار شده با



شکل ۲-۶- مراحل انجام احیاء سنگ آهن از طریق کوره بلند



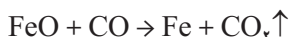
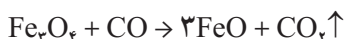
شکل ۷-۲- کوره بلند احیاء آهن در شرکت ذوب آهن اصفهان

نسبت‌های معینی کک و آهک ( $\text{CaCO}_3$ ) 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 (۷-۲) به چهار منطقه به شرح زیر تقسیم کرد. در کارخانه ذوب آهن اصفهان فرآیند احیاء سنگ آهن به این روش صورت می‌گیرد.

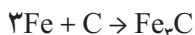
#### الف) منطقه خشک کردن ( منطقه

گرم‌کننده): این قسمت که در ناحیه فوقانی قرار دارد در اثر عبور گازهای داغ از لابلای مواد ورودی به کوره رطوبت آنها تبخیر می‌شود.

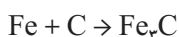
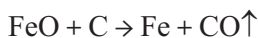
ب) منطقه احیاء: در این منطقه با افزایش دما، واکنش بین کانی‌های اکسید آهن و ماده احیاء‌کننده که بیشتر مونوکسید کربن ( $\text{CO}$ ) است شروع می‌شود. واکنش‌های این منطقه را می‌توان بصورت ذیل نوشت.



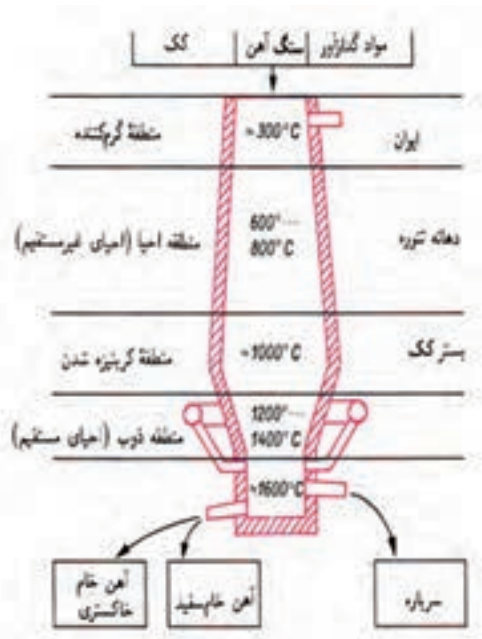
ج) منطقه کربنیزه شدن: در این منطقه که دما به حدود  $1000^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد می‌رسد قسمتی از آهن احیاء شده ضمن حرکت به سمت پایین کوره با کک گداخته واکنش داده و ترکیب کاربید آهن حاصل می‌شود.



د) منطقه ذوب: در ناحیه نزدیک به انتهای کوره که دما به حدود  $1400^\circ\text{C}$  -  $1200^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد می‌رسد، باقی مانده اکسید آهن احیاء می‌شود؛ ضمن اینکه واکنش آهن با کربن نیز صورت می‌گیرد.



۱- آهک به‌عنوان ماده کمک ذوب و سرباره‌ساز به کوره اضافه می‌شود که به حذف ناخالصی‌ها از مذاب کمک می‌کند.



شکل ۸-۲- 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.

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

— آهن خام خاکستری: محتوی ۳/۵ تا ۴ درصد کربن، ۱/۵ تا ۳ درصد سیلیسیم، حدود ۱ درصد منگنز، ۳٪ تا ۲ درصد فسفر و ۰/۶٪ درصد گوگرد است.

**۳-۲-۲- تولید آهن خام به روش احیاء مستقیم:** در این فرآیند ابتدا مواد نرمة محتوی اکسید آهن پس از اضافه کردن مقدار کمی آب، آهک و مواد افزودنی دیگر به وسیله سینی‌های بزرگ دوار به صورت گلوله‌های کوچکی تبدیل می‌شوند که گندوله نامیده می‌شوند (شکل ۹-۲). در واحد احیاء گندوله‌ها از قسمت فوقانی وارد کوره‌های احیاء می‌شوند. در این فرآیند به جای 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 می‌شود که تجهیزات مربوط به واحد احیاء مستقیم این واحد فولادسازی در شکل (۲-۱۰) مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۱۰- نمایی از کوره‌های احیاء مستقیم مجتمع فولاد مبارکه اصفهان

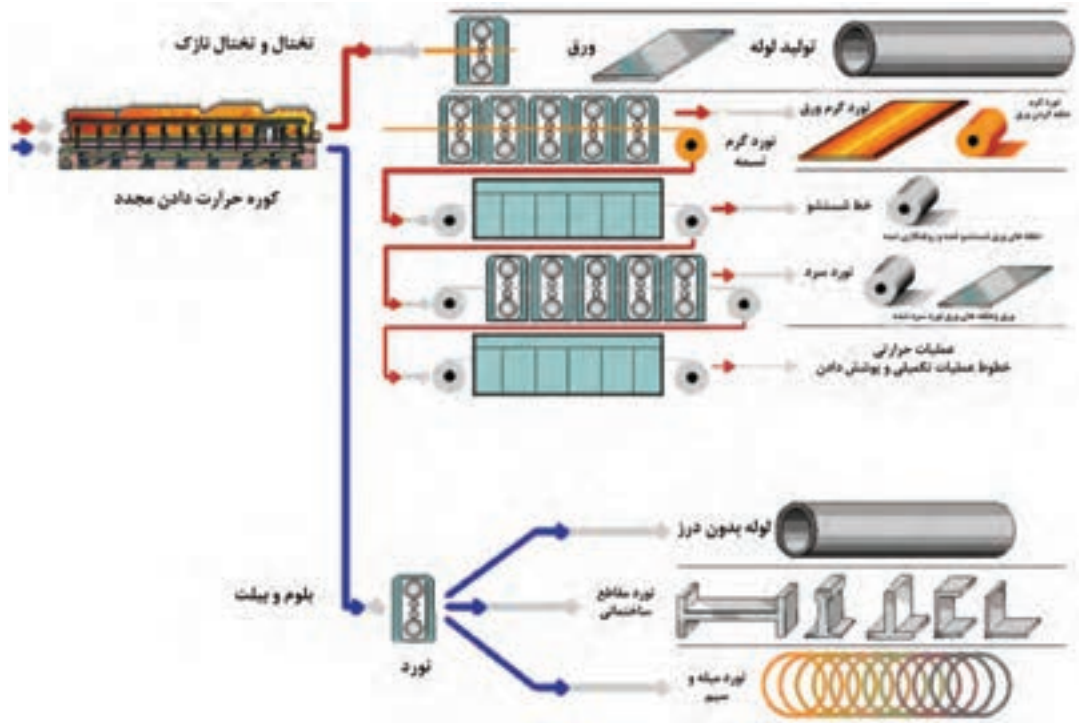
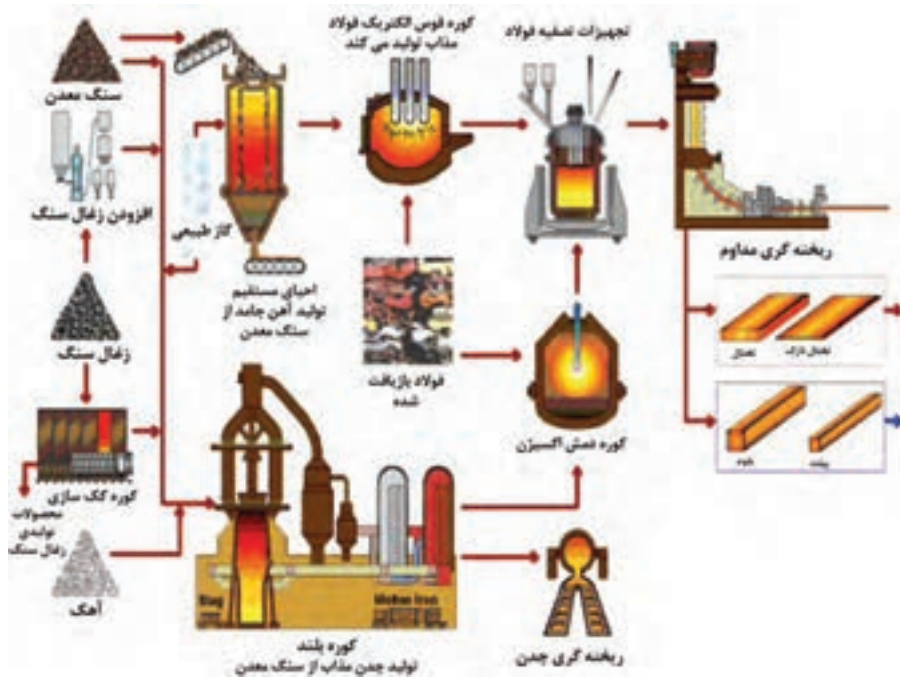
### ۲-۳- تولید فولاد از آهن خام

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، کارایی و کم کردن هزینه پیشرفت نموده ولی اساس آن تغییر نکرده است.

در شکل (۲-۱۱) 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.



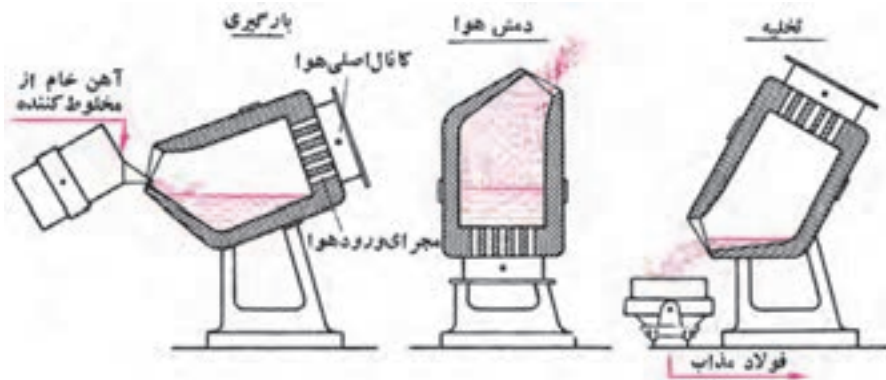


شکل ۱۱-۲- مراحل استخراج آهن از سنگ معدن، فولادسازی و تولید محصولات از نیم ساخته‌های فولادی

عملیات تصفیه مذاب آهن خام و فولادسازی به طور عمده توسط یکی از روش‌های زیر صورت

می‌گیرد :

- ۱- روش توماس - بسمر
- ۲- روش زیمنس - مارتین
- ۳- روش کوره قوس الکتریکی



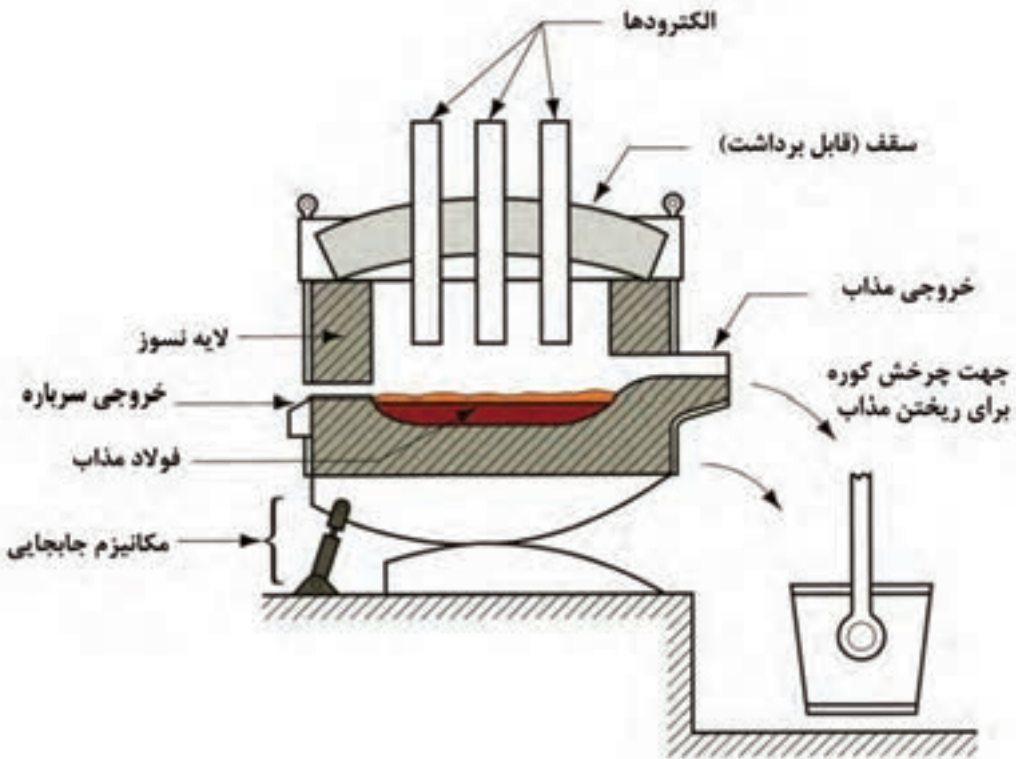
شکل ۱۲-۲ تولید فولاد به روش توماس - بسمر که در واحدهای قدیمی صورت می‌گیرد



شکل ۱۳-۲ کوره زیمنس - مارتین که نسبت به روش توماس جدیدتر است.

فولادسازی در کوره‌های قوس الکتریکی یکی از روش‌های جدید متداول و مدرن فولادسازی

به‌شمار می‌رود (شکل ۱۴-۲).



شکل ۱۴-۲- 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.

#### ۲-۴- تولید محصولات فولادی

همان‌طور که در شکل (۲-۱۱) 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 (۲-۱) و شکل (۲-۱۵) محصولات متداول شرکت‌های فولادسازی نشان داده شده است.



نمودار ۱-۲- محصولات متداول شرکت های فولادسازی



شکل ۱۵-۲- انواع متداول محصولات کارخانه های فولادسازی

## ۵-۲- استخراج فلزات به روش تریا 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 صرفه تر بوده و میزان مصرف انرژی و نیز آلودگی محیط زیست در آن کمتر می‌باشد. این روش بر مبنای انحلال شیمیایی عناصر از کانی‌های معدنی و سپس رسوب کاتیون‌های فلز مورد نظر از محلول با استفاده از جریان الکتریکی انجام می‌شود. به طور معمول استخراج به روش تر بیشتر برای استخراج فلزات غیر آهنی به کار 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.

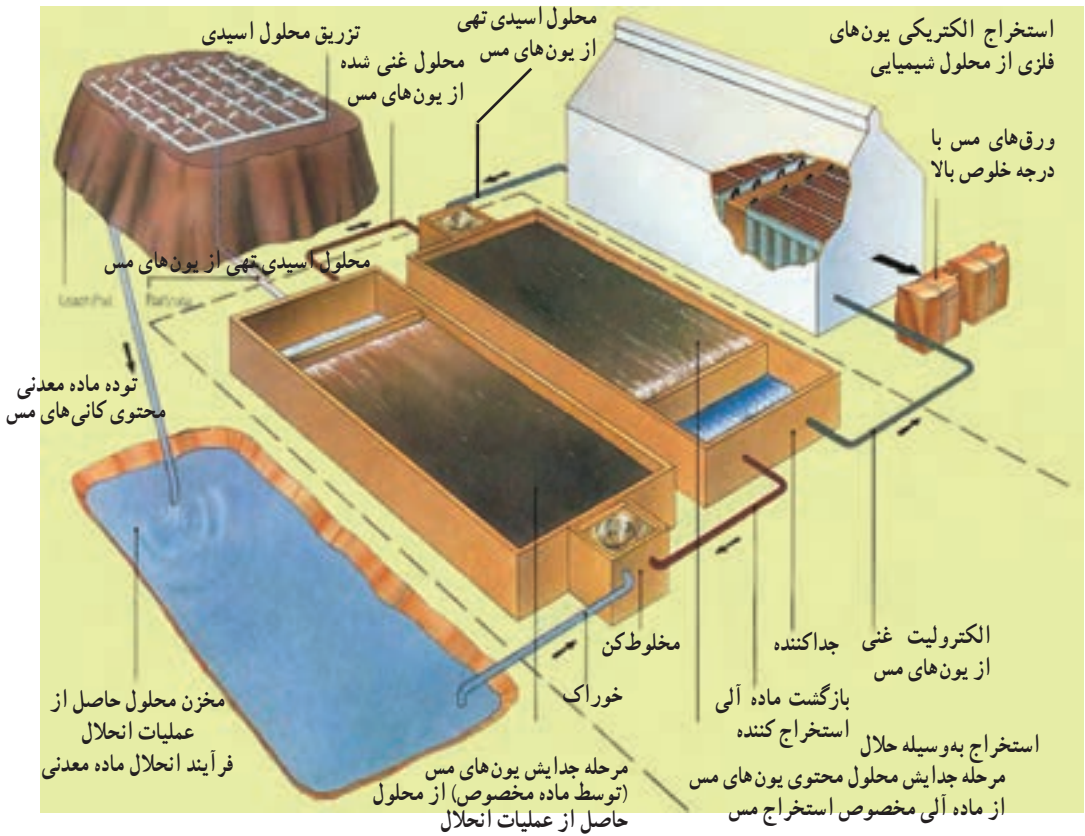
۱-۵-۲- مراحل استخراج فلز به روش هیدرومتالورژی: در شکل (۱۶-۲) مراحل مختلف فرآیند استخراج فلز مس به روش هیدرومتالورژی نشان داده شده است. این مراحل را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- ۱- استخراج سنگ از معدن و انتقال آنها به محل مناسب
- ۲- تزریق حلال مناسب جهت حل کردن عنصر فلزی مورد نظر از ترکیب سنگ معدن
- ۳- جمع‌آوری محلول محتوی کاتیون‌های عنصر مورد نظر
- ۴- انتقال محلول جمع‌آوری شده به حوضچه‌هایی جهت رسوب ذرات جامد موجود در محلول و مواد مزاحم دیگر
- ۵- افزایش عیار محلول نسبت به یون فلز مورد نظر با استفاده از مواد شیمیایی مناسب
- ۶- انتقال محلول پرعیار شده به سل‌های الکترووینینگ<sup>۲</sup> و رسوب کاتیون‌های فلز مورد نظر با استفاده از جریان الکتریکی روی سطح الکترودهای کاتد
- ۷- جمع‌آوری ورق‌های کاتدی پس از تشکیل رسوب فلزی (شکل ۱۷-۲) و تکرار سیکل

فوق

۱- به یون‌های با بار مثبت کاتیون می‌گویند.

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



شکل ۱۶-۲. مراحل استخراج فلز مس به روش هیدرومتالورژی



شکل ۱۷-۲. ورق های مسی تولید شده در کارخانه الکترووینینگ مجتمع مس سرچشمه

۱- مراحل آماده‌سازی سنگ آهن را نام برده و به صورت مختصر توضیح دهید.

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

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

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

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

۶- تفاوت روش پیرو متالورژی و هیدرومتالورژی چیست؟

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

۸- کدام یک سنگ معدن آهن نیست؟

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

۹- برای احیای سنگ آهن در کارخانه‌های فولادسازی شرکت‌های فولاد

مبارکه و ذوب آهن اصفهان به ترتیب از کدام روش استفاده می‌شود؟

الف) فولاد مبارکه به روش 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

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

الف) دمش هیدروژن    ب) دمش اکسیژن

ج) دمش آرگون    د) دمش نیتروژن