

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی شیمی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

(گرایش مهندسی شیمی پیشرفته)

عنوان:

تهیه نرم افزار شبیه سازی عملکرد راکتورهای بستر متحرک

نگارش:

سید محمد مهدی نوری

استاد راهنما:

دکتر حبیب آل ابراهیم

استاد مشاور:

دکتر اسماعیل جمشیدی

بهمن ماه ۸۶



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

بسمه تعالی

شماره: .....

فرم اطلاعات پایان نامه  
کارشناسی ارشد و دکترا

معاونت پژوهشی

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: سید محمد مهدی نوری      دانشجوی آزاد            بورسیه            معادل        
شماره دانشجویی: ۸۴۱۲۲۰۱۸      دانشکده: مهندسی شیمی      رشته تحصیلی: مهندسی شیمی گرایش پیشرفته

نام و نام خانوادگی استاد راهنما: دکتر حبیب آل ابراهیم

عنوان به فارسی: تهیه نرم افزار شبیه سازی عملکرد راکتورهای بستر متحرک

عنوان به انگلیسی: "Simulation Software Preparation for The Moving Bed Reactors"

نوع پروژه: کارشناسی ارشد

کاربردی            بنیادی            توسعه‌ای            نظری     

تاریخ شروع: ۸۵/۶/۲۰      تاریخ خاتمه: ۸۶/۱۱/۱۰      تعداد واحد: ۶

سازمان تأمین کننده اعتبار:

واژه‌های کلیدی به فارسی: شبیه سازی - راکتور بستر متحرک - احیاء مستقیم - مدل غیر همدم

واژه‌های کلیدی به انگلیسی: Simulation - Moving Bed Reactors - Direct Reduction - Nonisothermal model

نظرها و پیشنهادهای منظور بهبود فعالیت های پژوهشی دانشگاه: تخصیص اعتبار مالی بیشتر به این بخش، تامین تجهیزات بیشتر برای انجام پروژه های آزمایشگاهی

استاد راهنما: دکتر حبیب آل ابراهیم

دانشجو: سید محمد مهدی نوری

امضاء استاد راهنما:      تاریخ:

## فصل اول

آشنایی با آهن و روش‌های تولید آن

آهن از مهم ترین فلزاتی است که در پوسته زمین وجود دارد. مقدار آهن در پوسته زمین پس از عناصر اکسیژن، سیلیسیم و آلومینیم در مرتبه چهارم قرار دارد. آهن به صورت ترکیبات اکسیدی، کربناتی، سیلیکاتی، سولفور و نیز سایر کانی هایی که از نظر متالورژی استخراجی آهن از اهمیت کمتری برخوردار هستند، در طبیعت وجود دارد. عدد اتمی آهن در جدول مندلیف ۲۶ و وزن اتمی آن ۵۵/۸۵ گرم به ازای مول، ظرفیتهای آن ۲ و ۳ و جرم مخصوص آن ۷/۸۶۴ گرم به ازای سانتیمتر مکعب است.

آهن خالص بر حسب درجه حرارت آن می تواند در فازهای مختلف وجود داشته و پایدار باشد. نقاط تحول فازهای آهن به ترتیب زیر هستند:

$\alpha-Fe = \beta-Fe$  در دمای ۷۶۹ درجه سانتیگراد آهن آلفا به آهن بتا،

$\beta-Fe = \gamma-Fe$  در دمای ۹۱۱ درجه سانتیگراد آهن بتا به آهن گاما،

$\gamma-Fe = \delta-Fe$  در دمای ۱۳۹۲ درجه سانتیگراد آهن گاما به آهن دلتا،

$\delta-Fe = liq-Fe$  در دمای ۱۵۳۶ درجه سانتیگراد آهن دلتا، ذوب،

$liq-Fe = Gas-Fe$  در دمای ۲۸۶۲ درجه سانتیگراد آهن مذاب بخار می شود،

آهن آلفا تا دمای ۷۶۹ درجه سانتیگراد خاصیت مغناطیسی دارد و جذب آهن ربا می شود.

آهن، از این دما به بالا خاصیت مغناطیسی خود را از دست می دهد.

رنگ آهن، سفید مایل به خاکستری می باشد و جلای فلزی دارد. آهن قابلیت چکش خوری داشته و نرم<sup>۲</sup> است. ناخالصیهای همراه آهن در مذاب، معمولاً کربن، سیلیسیم، منگنز، فسفر و گوگرد هستند.

آهن بر حسب شرایط محیط می تواند در حالتها و یا در ترکیبات متفاوت وجود داشته و پایدار باشد. سنگهای اکسیدهای آهن از نظر متالورژی در درجه اول اهمیت قرار دارند[۱]. نظر به اینکه در این پروژه واکنش احیاء اکسید آهن در راکتور بستر متحرک مورد بررسی قرار می گیرد، ابتدا اکسیدهای آهن به اختصار معرفی می شود.

### ۱-۱) اکسیدهای آهن [۱]

چون در فرآیند احیاء سنگ آهن، اکسیدهای متفاوتی از آهن تشکیل و ویژگی آنها در بررسی های ترمودینامیکی و سینتیکی احیاء مؤثر هستند، لذا در زیر به اختصار اکسیدهای آهن مورد بررسی قرار می گیرند. جدول (۱-۱) مهمترین سنگ های معدنی آهن را نشان می دهد[۲].

جدول (۱-۱) مهمترین سنگ معدنی آهن

Parameter	Mineral					
	Hematite	Magnetite	Goethite	Siderite	Ilmenite	Pyrite
CAS Registry Number	[1309-37-1]	[1309-38-2]	[1310-14-1]	[14476-16-5]	[12168-52-4]	[1309-36-0]
chemical name	ferric oxide	ferrous-ferric oxide	hydrous iron oxide	iron carbonate	iron-titanium oxide	iron sulfide
chemical formula	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	HFeO <sub>2</sub>	FeCO <sub>3</sub>	FeTiO <sub>3</sub>	FeS <sub>2</sub>
iron, wt %	69.94	72.36	62.85	48.20	36.80	46.55
color	steel gray to red	dark gray to black	yellow or brown to nearly black	white to greenish gray to black	iron-black	pale brass-yellow
crystal	hexagonal	cubic	orthorhombic	hexagonal	hexagonal	cubic
specific gravity	5.24	5.18	3.3-4.3	3.83-3.88	4.72	4.95-5.10
Mohs' hardness	6.5	6	5-5.5	3.5-4	5-6	6-6.5
melting point, °C	1565	1600			1370	
magnetism		strong			slight	

1- Malleable

2- Ductile

### ۱-۱-۱) وستیت

از بین اکسیدهای آهن، اکسیدهای آهن فرو<sup>۱</sup> که آن را وستیت<sup>۲</sup> می نامند، کمترین مقدار اکسیژن را دارد. فرمول شیمیایی وستیت را معمولاً به صورت FeO می نویسند، در صورتی که نسبت مولی اکسیژن به آهن در وستیت برابر یک به یک در هیچ درجه حرارتی وجود ندارد. نسبت اکسیژن به آهن وستیت همیشه بیشتر از مقدار مول به مول و به عبارت دیگر، در شبکه وستیت، مقدار آهن به اکسیژن همواره کمتر از مقدار مول به مول است.

### ۱-۱-۲) ماگنتیت

ماگنتیت<sup>۳</sup> از سنگهای مهم آهن به شمار می رود. این سنگ در صورت خلوص ۷۲/۳۶ درصد وزنی آهن و ۲۷/۶۴ درصد اکسیژن دارد و پتانسیل اکسیژن آن از پتانسیل وستیت بیشتر است. شبکه بلوری ماگنتیت، مانند وستیت، به صورت مکعب است. فرمول شیمیایی ماگنتیت را معمولاً به صورت  $Fe_3O_4$  می نویسند. این اکسید، حاوی آهن های دو ظرفیتی و سه ظرفیتی است. ماگنتیت خاصیت فرومغناطیسی نسبتاً شدید دارد، لذا ماگنتیت، مانند آهن، به وسیله آهن ربا جذب می شود. از این خاصیت، در کانه آرای سنگهای آهن ماگنتیتی استفاده می شود. رنگ ماگنتیت از خاکستری تا سیاه تغییر می کند و جرم مخصوص آن ۵ گرم به ازای سانتیمتر مکعب است. ماگنتیت می تواند در فازهای آلفا و بتا وجود داشته باشد. در دمای ۵۹۳ درجه سانتیگراد، مبادله ماگنتیت آلفا به بتا و در دمای ۱۵۹۷ درجه سانتیگراد، ماگنتیت ذوب می شود.

### ۱-۱-۳) هماتیت

اکسید آهن فریک ( $Fe_2O_3$ )، که آن را هماتیت<sup>۴</sup> می نامند با ۳۰/۰۶ درصد وزنی اکسیژن حداکثر پتانسیل اکسیژن را در بین اکسیدهای آهن داراست.

۱- آهن دو ظرفیتی

2- Wustite ( $Fe_{1-y}O$ )

3- Magnetite

4- Hematite

هماتیت از مهمترین سنگهای آهن دار، به شمار می رود. رنگ آن از قرمز تا سیاه تغییر می کند و وزن مخصوص آن بین ۴/۹ و ۵/۳ گرم به ازای سانتیمتر مکعب است. هماتیت در انواع آلفا، بتا و گاما وجود دارد. در دمای ۶۸۰ درجه سانتیگراد، مبادله هماتیت آلفا به بتا و در دمای ۷۸۰ درجه سانتیگراد، مبادله هماتیت بتا به گاما صورت می گیرد.

هرگاه در شبکه ماگنتیت به جای یونهای آهن دو ظرفیتی، یون آهن سه ظرفیتی جایگزین شود در این صورت هماتیت آلفا و یا بتا تولید می شود که ساختمان بلوری آن، مانند ماگنتیت، مکعب است. هماتیت آلفا و بتا در فرآیند فولادسازی، حین دمیدن اکسیژن در کنورتور، به صورت دود قرمز یا قهوه ای از دهانه کنورتور خارج می شود و هماتیت آلفا ناپایدار است اما در درجه حرارت های بالا، هماتیت گاما پایدار می باشد که شبکه آن منشوری است.

هماتیت می تواند به صورت گوتیت<sup>۱</sup> و لیمونیت<sup>۲</sup> نیز در طبیعت وجود داشته باشد. اکنون این اکسیدها به اختصار تشریح می شوند.

#### ۱-۱-۴) سایر ترکیب های آهن

به جز سنگ های ماگنتیت و هماتیت که در بخش پیش به آن اشاره شد، آهن می تواند به صورت های دیگری نیز در طبیعت وجود داشته باشد که به اختصار تشریح می شوند.

##### ۱-۱-۴-۱) گوتیت

اکسید آهنی را که به ازای یک مول هماتیت، یک مول آب همراه داشته باشد را گوتیت می نامند. گوتیت در صورت خالص بودن، حاوی ۶۲/۸۶ درصد آهن است. رنگ گوتیت از قرمز تا قهوه ای تغییر می کند و شبکه آن مانند هماتیت لوز وجهی است.

---

1- Geotite :  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$  یا  $2(FeOOH)$

2- Limonite :  $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$  یا  $3Fe(OH)_3$

#### ۱-۱-۴-۲) لیمونیت

هرگاه یک مول هماتیت، سه مول آب همراه داشته باشد، آن را لیمونیت نامند. این اکسید آهن در صورت خالص بودن، حاوی ۵۲/۲۷ درصد آهن می باشد و رنگ آن زرد است. تحلیل از طریق اشعه ایکس نشان می دهد که ساختمان بلوری لیمونیت مانند گوتیت، لوز وجهی است.

#### ۱-۱-۴-۳) پیروتیت

پیروتیت<sup>۱</sup> از ترکیبات گوگرد با آهن است که خاصیت مغناطیسی شدید دارد. آهن در شبکه پیروتیت مانند شبکه وستیت، ناقص است. پیروتیت در صورت خلوص حدود ۶۳/۵۷ درصد وزنی آهن دارد. در نتیجه این سنگ به عنوان سنگ آهن به کار برده نمی شود زیرا این سنگ همواره با ناخالصی هایی همراه است اما در شرایط استثنایی که ناخالصیهای پیروتیت مطلوب باشد، مانند کانه های پیروتیت مس- نیکل دار معادن سادپوری در کانادا، آهن نیز می تواند بازیابی شود.

#### ۱-۱-۴-۴) پیریت

یکی از ترکیبات متداول آهن، پیریت<sup>۲</sup> است. این کانی، در صورت خلوص، ۴۶/۶ درصد وزنی آهن دارد، اما به علت گوگرد و ناخالصیهای عادی آن مانند مس، نیکل، کبالت و قلع نمی توان آن را برای تولید آهن و فولاد مصرف کرد<sup>۳</sup>. پیریت نیز در شرایط خالص می تواند به عنوان سنگ آهن به کار رود.

#### ۱-۱-۴-۵) سیدریت

کربنات آهن<sup>۴</sup>، که سیدریت نامیده می شود، از کانیهای مهم بشمار می رود و در کلیه نقاط جهان یافت می شود. سیدریت، در صورت خلوص، ۴۸/۲ درصد وزنی آهن دارد، ولی به علت یکسان بودن ساختمان بلوری آن با کربناتهای کلسیم، منیزیم و منگنز، اغلب حاوی این ترکیبات می باشد و به ندرت بیش از ۴۰ درصد آهن دارد.

---

1- Pyrrhotite (FeS)

2- Pyrite ( $FeS_2$ )

۳- مس و قلع برای خواص مکانیکی فولاد بسیار نامطلوب است.

4- Siderite ( $FeCO_3$ )



سیدریت بر اثر حرارت در هوا تجزیه می شود و با از دست دادن گازکربنیک ، ۲۸ درصد وزنی آن کاهش می یابد. در این فرآیند، اکسید فرو ( آهن دو ظرفیتی ) به ماگنتیت یا هماتیت اکسیده می شود و در نتیجه، درصد آهن سنگ افزایش می یابد[۲].

### ۱-۲) احیای سنگ آهن به فلز آهن

عنصر آهن در اکثر خاک ها و سنگ ها وجود دارد، اما تنها تعداد کمی از آن دارای درصد قابل ملاحظه ای آهن هستند که سنگ آهن نامیده می شوند.

در جدول (۱-۲) لیست کشورهایی که بزرگترین معادن آهن و بیشترین تولید را در سال ۱۹۹۲ داشته اند آمده است.

جدول (۱-۲) ذخایر معادن و تولید کشورها در سال ۱۹۹۲ (میلیون تن)

Country	Iron ore		Iron reserves
	Production	Reserves	
China	196	9,000	3,500
Brazil	146	17,300	10,100
Australia	117	28,100	17,900
Ukraine <sup>b</sup>	87	40,000	15,000
Russia <sup>b</sup>	83	38,000	14,000
United States	55	25,200	6,000
India	55	12,100	6,300
Canada	35	25,500	10,000
South Africa	28	9,300	5,900
Sweden	19	4,600	2,400
Venezuela	18	3,300	1,700
other countries	81	17,600	7,200
<i>Total</i>	920	230,000	100,000

هدف از احیای سنگ های آهن، حذف اکسیژن و ناخالصی های سنگ آهن در فرآیند تولید آهن و فولاد است. در روش سنتی احیای اکسیدهای آهن، ذوب آهن و تا اندازه ای حذف عناصر نامطلوب همراه آهن در کوره بلند و پالایش آهن خام (چدن) برای تولید فولاد، در کنورتور انجام می شود. در روشهای احیای مستقیم نحوه تولید آهن خام یا آهن اسفنجی و نیز پالایش آنها و موارد کاربرد آهن اسفنجی، متعدد است.

در روش سنتی تولید آهن خام در کوره بلند، احیای اکسیدهای آهن و عناصر همراه آهن توسط کک انجام می شود. اما به طور کلی احیای مستقیم سنگ های آهن به روش هایی اطلاق می شود که اکسیژن سنگ در درجه حرارتی پایین تر از دمای ذوب یا خمیری شدن سنگ یا گندله ها<sup>۱</sup> به وسیله کربن، گازهای حاصل از زغال یا خصوصا گازهای احیاء کننده تولیدی در اثر تبدیل گاز طبیعی، حذف شده و تغییر شکلی در ظاهر سنگ آهن خرد شده یا گندله ها در روند احیاء بوجود نیاید.

اغلب به علت حذف اکسیژن در حالت جامد و ثابت ماندن شکل ظاهری بار جامد، آهن تولیدی به صورت اسفنجی در می آید و به این علت به آن آهن اسفنجی می گویند. ویژگی آهن اسفنجی، که در برخی از روش های احیای مستقیم تولید می شود، عبارت است از:

۱ - تخلخل زیاد به علت حذف قسمت اعظم اکسیژن کانه به وسیله اجسام احیاء

کننده

۲ - ثابت ماندن شکل ظاهری گندله یا سنگ آهن خرد شده

۳ - وزن مخصوص ظاهری کم و سطح ویژه زیاد

۴ - عدم احیای اکسیدهای غیرآهنی و همچنین ناخالصی های سنگ و باقی ماندن

آنها در آهن اسفنجی

امروزه روش های احیای مستقیم، معنای گسترده تری دارند. اگر توسط کربن یا گازهای حاصل از زغال و یا گاز طبیعی، احیاء ذوب یا پالایش آهن خام در حالت پلازما انجام شود نیز جزء روش های احیای مستقیم به شمار می آیند.

در بعضی از روش های احیای مستقیم مقداری کربن بین ۰/۵ تا ۵/۵ درصد به صورت دوده یا سمانتیت در سطح آهن اسفنجی تشکیل می شود.

در سه دهه اخیر از طرفی به علت افزایش قیمت کک متالورژیکی و بالعکس وفور گاز طبیعی در برخی کشورهای نفت خیز و از طرف دیگر برتری گازهای حاصل از اکسایش جزئی گاز طبیعی نسبت به گازهای حاصل از زغال های نامرغوب و کک برای احیای روش های متعددی برای تولید آهن خام براساس کاربرد گاز طبیعی ابداع شده که برخی در سطح صنعتی نیز مورد بهره برداری قرار گرفته اند. روش های ابداع شده بر اساس کاربرد زغال های نامرغوب در سطح جهان چندان مورد بهره برداری صنعتی قرار نگرفته اند.

در بین کشورهای تولید کننده آهن اسفنجی ایران با تولید سالانه ۶/۹۰ میلیون تن پس از کشورهای هند و ونزوئلا در رتبه سوم قرار دارد [۳]. به علاوه کشور ایران با تولید سالانه ۵/۸۴ میلیون تن آهن اسفنجی بر اساس فرایند میدرکس به عنوان پیشرفته ترین کشور جهان در بکار گیری از این فرآیند برای تولید آهن و فولاد می باشد. از طرفی صنایع آهن و فولاد یکی از صنایع به شدت انرژی بر در سطح دنیا می باشد لیکن بر اساس تحقیقات انجام شده شدت انرژی بر واحد تولید آهن و فولاد در ایران به مراتب بالاتر از میزان آن در کشورهای دیگر که از تکنولوژی های مدرن استفاده می کنند، می باشد [۴]. حدود ۷/۲ درصد از کل گاز طبیعی و حدود ۴/۲ از کل برق ایران در صنایع فولاد صرف شده اند که از این میزان سهم صنایع فولاد بر اساس فرایند احیای مستقیم میدرکس حدود ۵/۱۳ از کل گاز طبیعی مصرفی و حدود ۳/۹۳ درصد از کل برق مصرفی می باشد.

از طرفی مشاهده می شود که حدود ۷۰ درصد از گاز طبیعی مصرف شده در مجتمع فولاد مبارکه در واحد احیای مستقیم و برای احیای اکسیدهای آهن و تولید آهن اسفنجی به کار می رود از طرف دیگر حداقل میزان گاز احیاء کننده مورد نیاز برای واکنش احیاء در حالت تئوریک (استوکیومتری) برابر ۶۰۲ مترمکعب به ازای هر تن آهن اسفنجی می باشد [۵].

لیکن میزان مصرف واقعی گاز احیاء کننده بیش از دو برابر این مقدار می باشد. حال اگر بتوان این مقدار را به سمت میزان تئوری نزدیک کرد بهره گاز احیاء افزایش یافته و در میزان مصرف انرژی صرفه جویی می شود زیرا اولاً از حجم گاز احیاء تولیدی کاسته خواهد شد، ثانیاً از حرارتی که در گرم و سرد کردن های گاز برگشتی از کوره تلف می شود صرفه جویی می شود.

بنابراین شرایط عملکردی و مشخصات کوره احیاء و ریفرمر تاثیر قابل ملاحظه ای را در میزان مصرف حامل های انرژی در قسمت احیاء دارد.

بنابراین در این پروژه هدف توسعه مدلی عددی از کوره به عنوان ابزاری برای پی بردن به جزئیات فرایند احیاء درون کوره می باشد که با استفاده از آن بتوان چگونگی اثر متغیرهای فرایندی را درون کوره شناسایی نموده سپس بررسی متغیرها بر کارایی و عملکرد کوره انجام می شود.

## ۳-۱) فرایندهای تولید آهن (Ironmaking Processes) [۲]

فرایندهای تولید به فرایندهایی گفته می شود که اکسید آهن را به آهن احیاء کنند. آهن تولید شده معمولاً حاوی کربن و دیگر ناخالصی هایی است که در فرایندهای پائین دستی حذف می شوند. در حال حاضر فرایندهای احیاء به سه شاخه اصلی تقسیم می شوند:

- ۱ - کوره بلند (Blast Furnace)
- ۲ - احیای مستقیم (Direct Reduction)
- ۳ - احیای همزمان با ذوب (Direct Smelting)

### ۱-۳-۱) روش کوره بلند

روش کوره بلند مهمترین روش تولید آهن می باشد. به طور خلاصه کوره بلند یک راکتور بلند با جریان متقابل و به صورت استوانه ای می باشد. سنگ آهن و زغال کک از بالا به صورت پیوسته وارد راکتور می شوند. فشار داخل آن بین ۱-۳ اتمسفر می باشد. هوای پیش گرم شده توسط نازل هایی که در پایین راکتور قرار دارند به داخل آن دمیده می شود.

اکسیژن هوا با کک واکنش داده و گاز کاهنده که منوکسید کربن می باشد را تولید می کند که از میان توده جامد به سمت بالا حرکت می کند و حرارت لازم برای ذوب را فراهم می کند، ثانیا سنگ آهن را احیاء کرده و آهن تولید می کند و همچنین سنگ آهن و کک را گرم کرده تا به دمای مورد نیاز برای واکنش برسند.

نیتروژن موجود در هوا توسط احتراق کک گرم شده و به انتقال حرارت با توده جامد کمک می کند. گاز خروجی از بالای راکتور سوزانده شده و برای پیش گرم کردن هوای ورودی به راکتور استفاده می شود.

آهن مذاب و سرباره (اکسیدهای مذاب) در پائین کوره جمع می شوند و به طور شبه پیوسته از پائین آن خارج می شوند و در این قسمت سرباره های آهن از آن جدا شده و آهن برای فرایندهای بعدی به قسمت های مربوطه انتقال پیدا می کند.

همانطور که در جدول (۳-۱) نشان داده شده است بیشترین حجم آهن تولید شده برای تولید فولاد استفاده می شود.

جدول (۳-۱) تولید جهانی شمش آهن و مصرف آن در صنایع فولاد [۲]

Year	Production, t × 10 <sup>6</sup>	Consumption for steelmaking	
		t × 10 <sup>6</sup>	%
1983	48.706	45.783	94.0
1984	51.904	45.282	87.2
1985	50.446	49.547	98.2
1986	43.952	43.312	98.5
1987	48.410	47.413	97.9
1988	55.745	54.833	98.4
1989	55.873	55.299	99.0

### ۱-۳-۱-۱ مواد اولیه

اکسید آهن ورودی به کوره اکثراً به شکل قرص یا کلوخه می باشد. مقدار آهن کلی در اکسیدهای آهن به طور معمول بین ۶۰٪ تا ۶۶٪ می باشد. درصد سلیسیم در آن حتماً باید کمتر از ۰.۵٪ باشد.

برای اینکه پدیده نفوذ گاز از میان جامد به خوبی انجام شود و افت فشار بالایی نداشته باشیم باید اندازه گندله ها به دقت کنترل شوند و ذرات بسیار ریز (کوچکتر از ۶ میلیمتر) باید کمتر از ۲٪ کل ذرات باشند. و حداقل ۸۰٪ گندله ها باید اندازه ای بین ۹ میلیمتر تا ۱۳ میلیمتر داشته باشند و حداکثر مقدار گندله های بزرگتر از ۱۳ میلیمتر حدود ۱۰٪ می باشد.

کک مورد استفاده معمولاً حاوی ۹۵-۸۵ کربن خالص، کمتر از ۲٪ مواد فرار، ۵٪ تا ۱۳٪ خاکستر، ۰.۶٪ تا ۱/۳٪ سولفور و ۱۰٪-۲٪ رطوبت است.

کربن برای فرایند احیاء مورد نیاز است علاوه بر آن به وسیله احتراق با هوا، گرمای مورد نیاز را تأمین می کند. همچنین کک به علت مقاومت مکانیکی بالا یک ناحیه ثابت برای حرکت گاز به سمت بالا را فراهم می کند. معمولاً اندازه دانه های کک بین ۱۵ تا ۷۵ میلیمتر است.

هوا را نیز می توان به عنوان یکی از مواد اولیه در نظر گرفت. هوا ابتدا در یک کوره تا دمای ۹۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد گرم می شود، حدود ۱/۵ تن هوا برای تولید یک تن آهن مورد نیاز است.

### ۱-۳-۱) معادلات واکنش

از دیدگاه کلی، مهمترین واکنش های کوره بلند عبارتند از :

اکسیداسیون کربن و تولید منوکسیدکربن و ایجاد گرما در ناحیه احتراق



احیای رطوبت داخل کوره بوسیله کربن و تولید منوکسیدکربن و هیدروژن



احیای اکسید آهن بوسیله کربن و تولید آهن و منوکسیدکربن



احیای اکسید آهن بوسیله کربن و تولید آهن و دی اکسیدکربن



احیای اکسید آهن بوسیله هیدروژن و تولید آهن و بخار آب



همه واکنش های احیاء گرماگیر هستند. گرمای این واکنش ها بوسیله واکنش (۱-۱) و حرارت

محسوس هوای داغ ورودی تأمین می شود.

کوره احیاء را می توان به چهار ناحیه تقسیم نمود (از پائین به بالا) :

### ۱) کف کوره و دهانه های ورودی

کک در حین پائین آمدن در داخل کوره بوسیله گاز بالارونده گرم می شود ( تا دمای حدود

۱۳۷۰ درجه سانتیگراد) و زمانی که به دهانه های ورودی هوا می رسد با اکسیژن هوای ورودی به

سرعت واکنش می دهد. البته میزان کک خیلی بیشتر از استوکیومتری احتراق کامل با اکسیژن هواست.

واکنش های انجام شده عبارتند از :



واکنش (۶-۱) واکنش احتراق کک و (۷-۱) واکنش تبدیل به گاز زغال می باشد.

## ۲) ناحیه ذوب و احیای نهایی وستیت

هیدروژن و منوکسیدکربن در داخل کوره به سمت بالا حرکت کرده و به صورت متقابل با وستیت که در مراحل قبل تولید شده واکنش می دهند و تولید آهن می کنند.



آهن در طی تماس با کک ذوب شده مقداری کربن جذب می کند. به خاطر گرماگیر بودن مجموع واکنش‌ها، دمای گاز در طی بالا رفتن از کوره کاهش می یابد.

## ۳) ناحیه دما ثابت

زمانی که گازها (منوکسیدکربن، هیدروژن و نیتروژن) تا حدود ۹۲۵ درجه سانتیگراد سرد شوند، واکنش (۷-۱) از لحاظ ترمودینامیکی ثابت می شود زیرا در این حالت واکنش (۸-۱) و واکنش غالب می باشد که به مقدار کمی گرمازا می باشد و چون واکنش (۹-۱) به مقدار بسیار کمی انجام می شود، دمای گاز زیاد افت نمی کند.

مقدار کلی دی‌اکسیدکربن و بخار آب توسط تعادل واکنش WGS<sup>۱</sup> مشخص می شود.



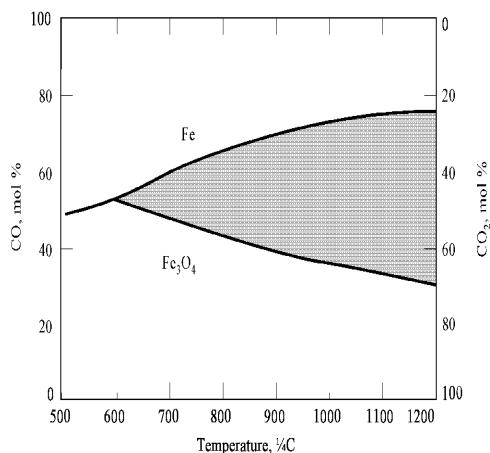
## ۴) ناحیه احیاء ماگنتیت و هماتیت (ناحیه بالای کوره)

هر چقدر مقدار دی‌اکسیدکربن و بخار آب در گاز بیشتر شود، قدرت کاهندگی آن برای احیاء وستیت به آهن کمتر می شود.

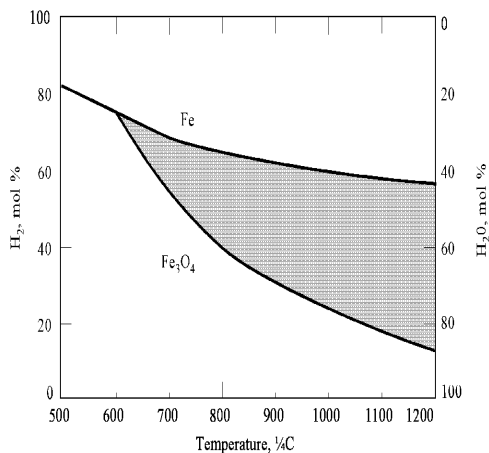
شکل های (۳-۱) نواحی پایداری سیستم های آهن- کربن - اکسیژن و آهن- هیدروژن- اکسیژن را نشان می دهد. همان طور که در شکل دیده می شود گازی که قادر به احیاء وستیت نمی باشد، می تواند ماگنتیت را به وستیت احیاء کند.



<sup>۱</sup> Water gas shift



(a)



(b)

شکل (۱-۳) نمودار فازی (ناحیه ی هاشور زده مربوط به وستیت است) (a) Fe-O-H (b) Fe-O-C

به منظور شرایط عملیاتی پایدار، مقدار وستیت تولید شده بوسیله این واکنش ها باید دقیقاً با مقدار وستیت تبدیل شده به آهن در قسمت های پائین تر کوره برابر باشد. در قسمت بالای کوره منوکسیدکربن و هیدروژن باقیمانده به سرعت با هماتیت که از بالای کوره وارد آن می شود، واکنش می دهد.



در این ناحیه دمای گاز به دلیل ورود مواد جامد سرد، تبخیر رطوبت موجود در دانه های جامد و واکنش های گرماگیر به شدت افت می کند. (مجموع واکنش های تبدیل هماتیت به وستیت گرماگیر می باشد)



### ۱-۳-۲) احیای مستقیم (Direct Reduction)

احیای مستقیم، فرایند تولید سنگ آهن به آهن خالص بدون ذوب کردن آن است. آهن تولیدی توسط این فرایند یکی از خوراک‌های با کیفیت بالا برای تولید فولاد می باشد. روش احیای مستقیم نسبت به روش کوره بلند از لحاظ محیط زیست پاک‌تر و هزینه تولید پائین‌تری دارد. تولید تجاری به روش احیای مستقیم در سال ۱۹۵۰ میلادی آغاز گردید اما تا سال ۱۹۷۰ رشد چندانی نکرد. در سال ۱۹۹۳ تولید جهانی به روش احیای مستقیم حدود ۲۳/۹ میلیون تن بود که دلیل این رشد سریع، خلوص بالای آهن بدست آمده از آن و نیز وفور گاز طبیعی در برخی از کشورها نسبت به زغال سنگ مرغوب بوده است.

### ۱-۳-۲-۱) خواص فیزیکی

حذف اکسیژن از اکسید آهن در طی فرایند احیاء باعث ایجاد فضای خالی در داخل آن می شود بنابراین، آهن تولید شده با این روش دانسیته پائین‌تر، تخلخل بالاتر و سطح مخصوص بیشتری از اکسید آهن دارد. برخی از خواص آهن تشکیل شده به روش احیاء مستقیم در جدول (۱-۴) آمده است.

جدول (۱-۴) خواص فیزیکی محصول آهن اسفنجی حاصل از فرایند احیای مستقیم

Parameter	Pellets/lump	HBI
density, t/m <sup>3</sup>		
bulk	1.6-1.9	2.4-2.8
apparent	3.5	5.0-5.5
porosity, %	50	15
saturated water absorption, wt %	12-15	2-3
nominal size, mm	4-20	30 × 50 × 110

### ۱-۳-۲-۲) خواص شیمیایی

در جدول (۱-۵) ترکیب شیمیایی معمول آهن حاصل از احیای مستقیم نشان داده شده است.

جدول (۵-۱) ترکیب درصد محصول حاصل از فرایند میدرکس

Parameter	Pellet/lump	HBI
iron, wt %		
total	90-94	90-94
metallic	83-89	83-89
metallization, %	92-95	92-95
FeO, wt %	6.5-9.1	6.5-9.1
C, wt %	1.0-2.5	0.8-1.2
gangue, wt %	2.8-6.0	2.8-6.0
P, wt %	0.005-0.09	0.005-0.09
S, wt %	0.001-0.03	0.001-0.03
other	trace	trace

درصد متالیزاسیون به صورت درصدی از کل آهن که به آهن خالص تبدیل شده است تعریف می شود. به طور مثال اگر مقدار کل آهن ۹۲٪ و آهن فلزی تولیدی ۸۵٪ باشد متالیزاسیون برابر ۹۲/۴٪ می باشد. درصد احیاء برابر درصد اکسیژن حذف شده از اکسید آهن می باشد. فرض کنید که اکسید آهن اولیه هماتیت بوده و به صورت کامل به وستیت تبدیل شود، درصد احیاء برابر ۳۳/۳۳٪ می باشد. در فرایند احیای مستقیم به طور معمول حداقل ۹۰٪ احیاء یا ۸۵٪ متالیزاسیون انجام می شود. به طور تئوری می توان تمام اکسید آهن را به آهن فلزی تبدیل کرد اما از لحاظ اقتصادی به صرفه نمی باشد.

### ۱-۳-۲-۳) روش تولید

احیای سنگ آهن توسط واکنش‌هایی اتفاق می افتد که شبیه واکنش‌هایی است که در کوره بلند انجام می شود. اما دمای عملیاتی خیلی کمتر از کوره بلند است. این واکنش‌ها شامل احیاء به وسیله هیدروژن و منوکسید کربن بوده که خود این گازهای احیاء کننده از ریفرمینگ گاز طبیعی حاصل شده اند. واکنش‌ها به صورت زیر می باشند:

### الف) واکنش احیاء





### ب) تولید کاربید آهن



### ج) واکنش های ریفرمینگ



انرژی مورد نیاز برای فرایند احیاء مستقیم به طور مستقیم با گرمای واکنش های احیاء در دماهای فرایند رابطه دارد. خلاصه آنها در جدول (۶-۱) آمده است.

جدول (۱-۶) گرمای احیاء برای فرایندهای احیاء مستقیم، KJ/Kg Fe

Temperature, °C	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> →Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>			Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> →Fe <sub>n,95</sub> O			Fe <sub>n,95</sub> →Fe		
	H <sub>2</sub>	CO	C	H <sub>2</sub>	CO	C	H <sub>2</sub>	CO	C
600	-800	-6,873	21,77	17,38	7,27	54,945	16,15	-22,328	159,164
700	-1,829	-7,744	20,77	16,25	6,41	53,886	15,47	-22,006	158,716
800	-2,373	-8,129	20,25	15,88	6,30	53,539	16,45	-20,026	159,830
900	-2,541	-8,142	20,09	15,61	6,29	53,284	16,16	-19,331	159,574
1,000	-2,733	-8,183	19,89	15,46	6,39	53,112	15,67	-18,858	159,018
1,100	-2,951	-8,251	19,64	15,41	6,59	53,032	14,21	-19,364	157,410
1,200	-3,194	-8,347	19,36	15,48	6,91	53,037	12,82	-19,821	155,782
1,300	-3,462	-8,468	19,05	15,66	7,33	53,129	11,49	-20,231	154,133

احیای هماتیت به ماگنتیت با استفاده از هیدروژن و منوکسیدکربن نسبتاً گرمای کمتری می باشد و احیای وستیت به آهن با استفاده از منوکسیدکربن نیز مشابه حالت قبل گرمای کمتری می باشد. دیگر واکنشها به مقدار متوسط گرماگیر می باشند. به غیر از واکنشهای احیای ماگنتیت به وستیت و تبدیل وستیت به آهن توسط هیدروژن که به شدت گرماگیر می باشند. مقدار تولید در روش احیای مستقیم به عوامل دیگری از قبیل ضرایب انتقال جرم و حرارت هم وابسته است.

سرعت کلی واکنشهای احیاء تابعی از دما و فشار بستر، تخلخل و توزیع اندازه ذرات، ترکیب درصد گاز کاهنده و تماس مؤثر گاز و جامد در بستر می باشند. سرعت احیاء با افزایش دما و همچنین افزایش فشار ( تا ۵ اتمسفر) افزایش می یابد.

### ۱-۳-۳) فرایندهای احیای مستقیم

در سال ۱۹۹۳ حدود ۲۳/۹ میلیون تن آهن به روش احیای مستقیم در دنیا تولید شده است که پنج فرایند اصلی حدود ۹۵/۶٪ از این مقدار را تولید کردند. احیای مستقیم بر پایه گاز طبیعی حدود ۹۲/۵٪ از تولید جهانی و احیای مستقیم بر پایه کک حدود ۷/۵٪ را به عهده داشته اند.

مقایسه بین این پنج فرایند اصلی در جدول (۱-۷) آمده است.