

ذوب و تصفیه مستقیم فولاد

خطیب‌الاسلام صدرنژاد (دانشیار)

عبدالرضا سیمچی

دانشکده مهندسی متالورژی

چکیده

جایگزین کردن پودر زغال سنگ به جای کوک متالورژی در فرآیند فولادسازی مستقیم (Direct Steel Making) امروزه در سطح جهان مورد توجه قرار گرفته و پیشرفتهای نیز در این زمینه بدست آمده است. محدودیت‌های اصلی این فرآیند سرعت احیای اکسید آهن، انتقال حرارت، کف آلودشدن سرباره و درجه حرارت بالای گاز خروجی از راکتور ذوب و تصفیه است. این محدودیتها نه تنها بر سرعت تولید محصول، بلکه بر نوع و طرح راکتور نیز تأثیر می‌گذارند. در این مقاله ضمن تشریح دلایل طراحی و استفاده از فرآیند ذوب و تصفیه مستقیم، تأثیر عوامل مختلف بر میزان و سرعت تولید محصول در این فرآیند به کمک یک مدل ساده ریاضی پیش‌بینی و تخمین زده می‌شود.

مقدمه

ملاحظه‌ای کاسته شود. برای مثال به نظر می‌رسد تا آن زمان حداقل ۲۰٪ کل ظرفیت تولید دنیا به وسیله روش جدید «ذوب و تصفیه مستقیم» تأسیس خواهد شد بطوریکه اعتقاد بر این است که از این پس دیگر باطریهای کوک‌پزی و کوره‌های دمشی بلند دربارهای از کشورهای صنعتی مانند آمریکا ساخته نخواهند شد.

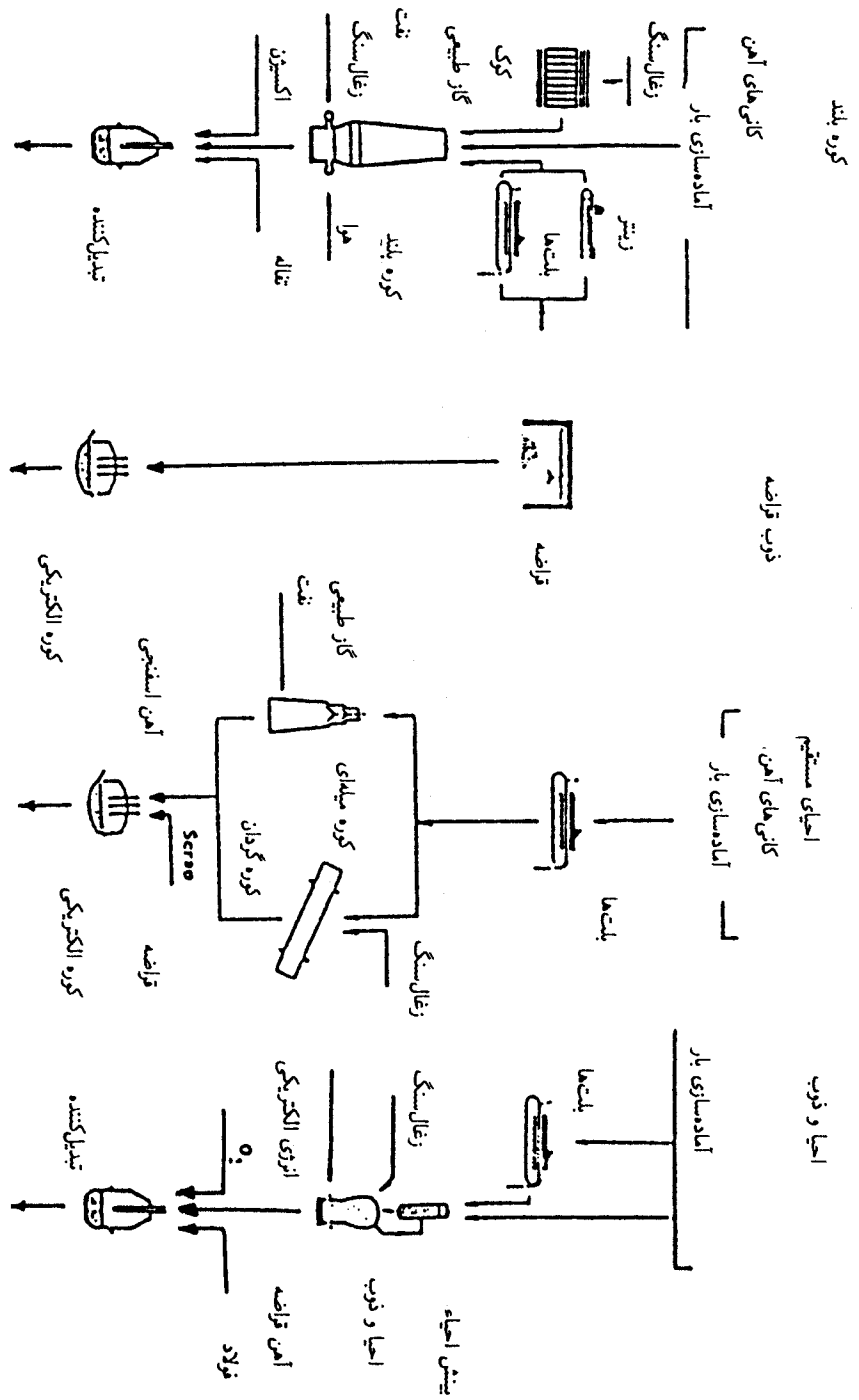
چندین روش جدید برای استفاده مستقیم از زغال سنگ به جای کوک در حال طراحی و ساخته شدن است. استفاده مستقیم از زغال سنگ بجای کوک در حقیقت موضوع روز است. کشورهای ژاپن، آمریکا، آلمان و استرالیا سهم اصلی تحقیقات در این زمینه را دارا هستند. کوشش‌های دیگری نیز برای کاهش کوک متالورژی و بار کردن مستقیم زغال سنگ به داخل کوره بلند به‌طور همزمان در اروپا در جریان است. ساخت باطریهای کوک‌سازی پهن (۶۰cm بجای ۴۵cm) با ارتفاع ۶ متر و قرار دادن هود برای هدایت گازها در بالای ماشینی که کوک به داخل آن تخلیه می‌شود نیز باعث کمی بهبود در عملیات کوک‌سازی شده است. ولی این تغییرات عمده به حساب نمی‌آیند. لذا باید به انتظار تغییرات اساسی‌تر در شیوه تولید فولاد بود.

در این میان تنها مؤسسه آهن و فولاد آمریکا «AISI» یک برنامه ۴ ساله تحقیقاتی را با بودجه ۳۰ میلیون دلار از سال ۱۹۸۸ میلادی آغاز نموده است. این برنامه مشتمل بر فعالیتهای تحقیقاتی در چند دانشگاه و ساخت یک واحد نیمه صنعتی

ظرفیت فعلی تولید فولاد در جهان تقریباً ۸۰۰ تا ۸۲۰ میلیون مترمکعب است [۱]. این رقم با توجه به افزایش سطح تولید در کشورهای جهان سوم و کاهش متقابل تولید در کشورهای صنعتی در سالهای آتی افزایش چشمگیری نخواهد داشت. حدود ۶۰٪ کل ظرفیت تولید فولاد از طریق روش سنتی مشتمل بر فرآیندهای کوک‌سازی، کلوخه‌سازی (آگلومراسیون) تولید آهن خام، ... و ۴۰٪ مابقی از طریق ذوب قراضه و آهن اسفنجی در کوره‌های قوس الکتریکی تأمین می‌شود (شکل ۱).

اما روش سنتی با حداقل ۴۰۰ سال سابقه تاریخی دارای اشکالات فراوانی است که عمده آنها آلوده‌سازی نسبتاً زیاد محیط زیست، کاهش عرضه زغال سنگ مرغوب برای تبدیل به کوک متالورژی، رقم بالای سرمایه‌گذاری برای ایجاد تأسیسات منقطع و غول‌آسای این روش، هزینه زیاد انرژی، مشکلات آگلومراسیون سنگ آهن و بالا رفتن استانداردهای بین‌المللی درخصوص اجتناب از آلودگی محیط زیست است. از طرفی برای اقتصادی شدن این روش، لازم است ظرفیت تولید حداقل ۲ تا ۳ میلیون تن در سال باشد که برای واحدهای کوچک صنعتی رقم بالایی است.

به همین دلایل پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۱۳۸۰ تغییرات اساسی در صنعت فولاد جهان بوجود آید و با پیشرفت تکنولوژیهای جدید از بار سنگین روشهای سنتی تا حد قابل



شکل ۱- روشهای گوناگون تولید فولاد.

۶- منقطع بودن سیستم،

فولادسازی مستقیم رومی توان همراه با ریخته‌گری پیوسته به صورت فرآیندی غیرمنقطع مشتمل بر احیاء اولیه، ذوب و تصفیه، گوگردزدائی و کربن‌زدائی پیوسته، عملیات در پاتیل و ریخته‌گری پیوسته مورد استفاده قرار داد.

شکل ۲ تأسیسات سیستم ذوب مستقیم ساخت کارخانه NKK ژاپن با تولید ۱۰۰ تن در روز را در مقایسه با سیستم سنتی تولید آهن خام نشان می‌دهد. این سیستم حاصل تحقیقات NKK از سال ۱۳۶۶ در کارخانه فوکویاما Fokuyama است. تحقیقات NKK به منظور افزایش بازدهی حرارتی از طریق عملیات تحت فشار و دمش کنترل شده اکسیژن به منظور اکسید کردن CO در بالای کوره (احتراق ثانویه) ادامه دارد. هدف برنامه رساندن ظرفیت به حد تجاری تا سال ۱۳۷۳ است.

در فرآیند ذوب و تصفیه مستقیم، مواد تغلیظ شده یا پلت‌های احیاء شده به داخل آهن مذاب پر کربن تزریق می‌شوند. این عمل با ریختن مواد از بالای کوره به سادگی انجام‌پذیر است. زغال‌سنگ از طریق لوله‌ای از بالا یا از طریق دمنده‌ها از کف بار می‌شود. اکسیژن توسط دمنده‌های بالائی یا پائینی به داخل کوره دمیده شده و باعث تولید حرارت لازم برای ذوب مواد داخل کوره می‌شود. در اثر احیاء سنگ معدن توسط زغال‌سنگ، فولاد مذاب پر کربنی بوجود می‌آید که با کنترل دقیق فشار جزئی اکسیژن، کربن آن تا حد مطلوبی کاهش خواهد یافت. CO و H_۲ تولید شده در اثر واکنشهای احیاء سنگ معدن در بالای کوره با اکسیژن با هوا وارد واکنش شده و گرمای حاصل از آن به حمام منتقل می‌شود. این فرآیند که به احتراق ثانویه (یا احتراق بعدی) موسوم است بسیار حرارت‌زا بوده و می‌تواند به موازانه حرارتی داخل کوره کمک نماید. از آهک یا سنگ آهک به عنوان روانساز استفاده می‌شود. مواد سنگی کانه آهن و خاکستر زغال‌سنگ به سرباره مذاب تبدیل می‌شوند. گاز خروجی برای پیش گرم کردن و احیاء اولیه وارد محفظه احیاء می‌شود. این گاز ممکن است قبل از ورود به محفظه احیاء شکسته شود.

محصولات اصلی ذوب و تصفیه مستقیم، آهن و سرباره مذاب است که باید به طور پیوسته از کوره خارج شوند. با اضافه کردن عملیات گوگردزدائی و کربن‌زدائی بر روی فلز مذاب خارج

۱۰ تنی در پیش‌بورگ [۱] می‌باشد که مراحل نهایی خود را طی می‌کند [۳]. پنج کمپانی بزرگ ژاپنی با سرمایه مشترک مشغول توسعه چنین روشی هستند. فعالیتهایی نیز در اروپا در جریان است. فرآیند فولادسازی Corex(KR) روشی مشابه با اندکی تفاوت است که توسط آلمان در افریقای جنوبی نصب و راه‌اندازی شده است. این فرآیند در حقیقت یک کوره بلند دو نیم شده است. که در نیمه بالائی احیاء اولیه و در نیمه پائینی عملیات گازی شدن زغال‌سنگ به همراه ذوب و احیاء کانه آهن انجام می‌شود.

بار این فرآیند که با تولید ۳۰۰,۰۰۰ تن در سال در حال کار است، سنگ معدن احیاء شده همراه با آهن اسفنجی است. واحد راه‌اندازی شده توسط کمپانی فولاد Nippon با ظرفیت ۳۶۰,۰۰۰ تن در سال دارای یک محفظه احیاء اولیه با بستر سیال است. این واحد از طریق تبدیل یک کنورتر ۱۷۰ تنی LD دارای مشخصات داده شده در جدول ۱ به یک کوره ذوب و تصفیه مستقیم راه‌اندازی شده است [۴].

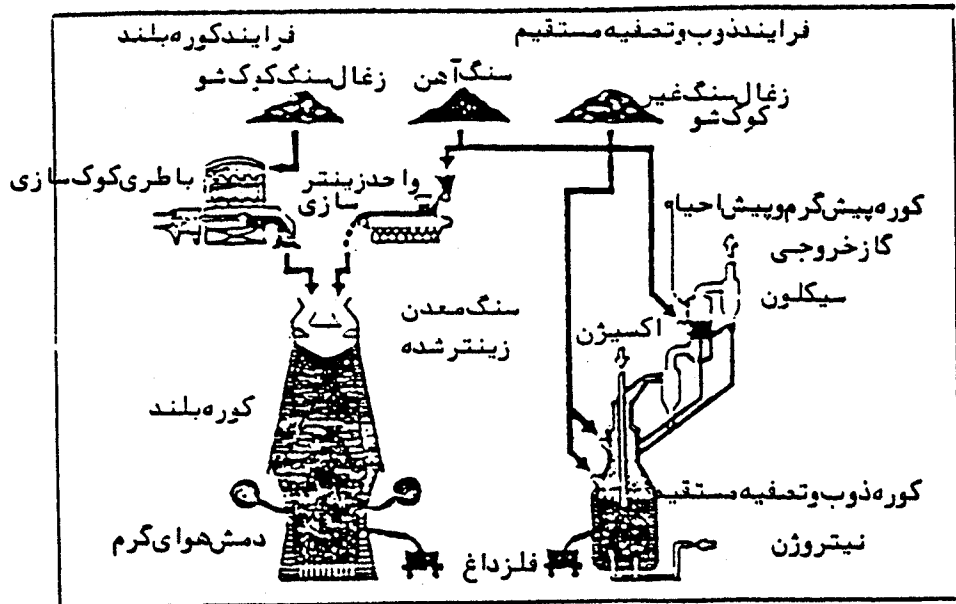
جدول ۱- مشخصات و شرایط عملکرد کوره ۱۷۰ تنی LD کمپانی فولاد Nippon که به کوره ذوب و تصفیه مستقیم تبدیل شده است [۴].

حجم داخل	۱۸۰ m ^۳
سطح حمام	۳۰ m ^۲
ظرفیت اکسیژن	۳۰۰۰۰ m ^۳
وزن سرباره	۱۵ - ۶۰ ton
دبی‌گاز از کف	۳۰۰۰ m ^۳ /hr
وزن فلز مذاب	۱۰۰ - ۱۴۰ ton

کلیات فرآیند

اشکالات عمده روش سنتی تولید فولاد که باید با طراحی و ساخت فرآیند ذوب و تصفیه مستقیم برطرف شوند عبارتند از:

- ۱- نیاز به زغال‌سنگ مرغوب،
- ۲- نیاز به واحد کلوخه‌سازی یا آگلومراسیون،
- ۳- غیر اقتصادی بودن واحدهای کوچک،
- ۴- نیاز به سرمایه‌گذاری زیاد،
- ۵- هزینه زیاد انرژی،



شکل ۲- مقایسه روشهای ذوب و تصفیه مستقیم با ذوب سنتی آهن، سیستم ذوب و تصفیه مستقیم توسط کارخانه NKK ژاپن به صورت نیمه صنعتی با تولید ۱۰۰ تن در روز به منظور فعالیتهای تحقیقاتی ساخته شده است [۲].

انرژی الکتریکی و رقابت آهن قراضه با آهن اسفنجی،
۱۲- کاهش آلودگیهای محیط.

استفاده از الگو برای طراحی فرایند

برای طراحی فرایند ذوب و تصفیه مستقیم، موازنه دقیق ماده و انرژی در داخل کوره های ذوب و احیاء مورد نیاز است. اما اندرکنش بین متغیرهای مختلف فرایند از قبیل درجه احیاء اولیه (PRD)، نسبت احتراق ثانویه (PCR) و ضریب انتقال حرارت (HTC) بسیار پیچیده بوده و فقط با استفاده از یک مدل جامع ریاضی انجام شدنی است. اما حل مدل با بکارگیری کامپیوتر عملی بوده و از این طریق مصرف زغال سنگ، روانساز، کانه دارای فلز و اکسیژن و ترکیب و حجم و دمای گاز خروجی راکتور ذوب و تصفیه مستقیم را می توان پیش بینی کرد. این چنین مدلی باید توان ارزیابی میزان تأثیر متغیرهایی نظیر ترکیب شیمیایی زغال سنگ، عیار سنگ معدن، تجزیه شیمیایی فلز، بازبسیته سرباره، نسبت احتراق ثانویه (PCR)، درجه احیاء اولیه (PRD)، ضریب انتقال حرارت (HTC)، نوع و میزان روانساز، نسبت قراضه به کانه، میزان اتلاف حرارت و درصد بکارگیری انرژی الکتریکی را داشته باشد. میزان عناصر ناخالصی همچون فسفر و گوگرد باقیمانده در فلز را نیز می توان توسط الگو تخمین زد.

شده از کوره و سپس استفاده از عملیات در پاتیل، مجموع اهداف فرایند ذوب و تصفیه مستقیم را می توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- ۱- امکان استفاده از زغال سنگهای نامرغوب و غیرکوک شو،
- ۲- حذف واحدهای کوک سازی،
- ۳- حذف واحدهای گندله سازی یا زینتر سازی،
- ۴- کاهش سرمایه گذاری اولیه،
- ۵- امکان انجام اقتصادی عملیات در ظرفیتهای کوچک،
- ۶- کاهش هزینه های سرمایه گذاری در اثر افزایش سرعت تولید نسبت به حجم کوره،
- ۷- انعطاف پذیری و امکان تغییر سرعت تولید،
- ۸- کاهش هزینه تولید،
- ۹- امکان تولید پیوسته فولاد،
- ۱۰- امکان افزایش بازدهی تولید با ازدیاد دما و تشدید تلاطم در کوره که باعث افزایش سرعت انتقال حرارت و جرم می شود. افزایش سطح تماس گاز، فلز و سرباره همچنین باعث افزایش سرعت واکنشهای شیمیایی غیرهمگن در مرز فازها می شود.
- ۱۱- حذف مشکلات روش احیاء مستقیم از قبیل ذوب الکتریکی، اکسید شدن دوباره آهن اسفنجی، قیمت زیاد

- ۱- درجه حرارت فلز،
 - ۲- ترکیب شیمیایی فلز (%C و %Si)،
 - ۳- درجه احیاء اولیه (PRD)،
 - ۴- نسبت احتراق ثانویه (PCR)،
 - ۵- بازیسیته سرباره،
 - ۶- درصد FeO سرباره،
 - ۷- مقدار گرد و غبار،
 - ۸- میزان اتلاف حرارت،
 - ۹- ترکیب شیمیایی زغال سنگ (%S, %O, %N, %H, %C), (%H₂O, %Al₂O₃),
 - ۱۰- ترکیب شیمیایی خاکستر در زغال سنگ (%Al₂O₃, %Fe₂O₃, %CaO, %SiO₂),
 - ۱۱- ترکیب شیمیایی سنگ معدن (%Al₂O₃, %SiO₂, %Fe),
 - ۱۲- درجه حرارت مواد ورودی (سنگ معدن، روانساز و هوا)،
 - ۱۳- موارد جنبی (بار کردن اختیاری CaCO₃ و آهن قراضه یا مصرف الکتریسیته).
- عوامل قابل محاسبه توسط برنامه به قرار زیرند:
- ۱- مصرف مواد مشتمل بر سنگ معدن، زغال سنگ، آهک CaO یا CaCO₃، اکسیژن و هوا،
 - ۲- وزن سرباره،
 - ۳- درجه حرارت، ترکیب شیمیایی و حجم گاز،
 - ۴- تخمین مقدار گوگرد فلز: برای این کار می توان از ظرفیت سولفید (CS) استفاده کرد:

$$CS = (\%S) \left(\frac{PO_2}{PS_2} \right)^{1/2} \quad (5)$$

که در آن (%S) مقدار گوگرد موجود در سرباره و PO₂ و PS₂ به ترتیب فشارهای اکسیژن و گوگرد در گاز هستند. برای محاسبه فشار گوگرد از معادله تعادلی زیر می توان استفاده کرد:

$$1/2S_2 = S \quad (6)$$

S محتوای گوگرد فلز را نشان می دهد. برای تعیین فشار اکسیژن می توان از تعادل بین Fe و FeO استفاده کرد:

$$FeO = Fe + 1/2O_2 \quad (7)$$

ار آنجا که اطلاعات کتی در رابطه با ضریب اکتیویته FeO در سرباره اندک است، لذا می توان آنرا ایده آل فرض کرد

در محاسبات، وزن زغال سنگ مصرفی برای هر تن فلز مذاب به عنوان متغیر ناشناخته در نظر گرفته می شود. کامپیوتر بعد از خواندن تمام شرایط اولیه، معادلات موازنه مواد را برای محاسبه میزان زغال سنگ لازم حل می نماید. برای مثال معادله موازنه جرم برای آهن به صورت زیر نوشته می شود:

$$\text{Fe (قراضه)} + \text{Fe (زغال سنگ)} + \text{Fe (کانه)} + \text{Fe (روانسان)} \\ = \text{Fe (سرباره)} + \text{Fe (گرد و غبار)} + \text{Fe (فلز مذاب)} \quad (1)$$

سپس، مقدار سنگ معدن و سنگ آهک مصرفی و مقدار سرباره تولید شده محاسبه می شوند. ترکیب شیمیایی گاز خروجی در یک درجه حرارت مشخص توسط یک زیربرنامه براساس واکنشهای تبادل بخار آب و دی اکسید کربن محاسبه شده و به دنبال آن حجم گاز خروجی تعیین می شود. با استفاده از ترکیب شیمیایی گاز و نسبت احتراق ثانویه (PCR) و ضریب انتقال حرارت که براساس معادله های (۲) و (۳) تعریف می شوند، می توان درجه حرارت گاز خروجی را حساب کرد. مصرف اکسیژن یا هوای لازم برای احتراق ثانویه نیز محاسبه می شود.

$$PCR = \frac{\%H_2 + \%CO}{\%CO + \%CO_2 + \%H_2 + \%H_2O} \times 100 \quad (2)$$

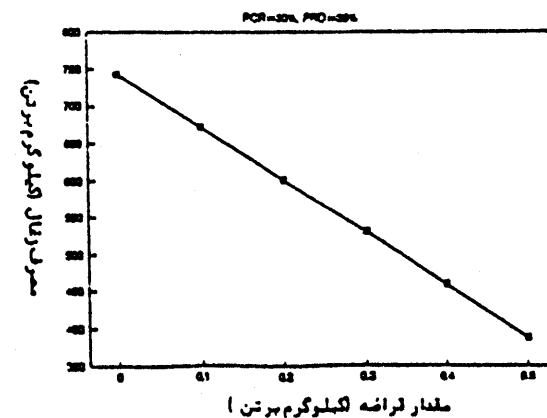
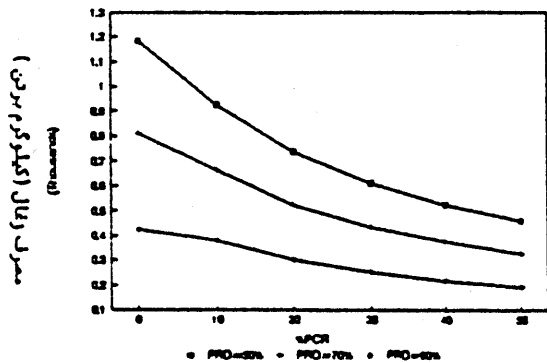
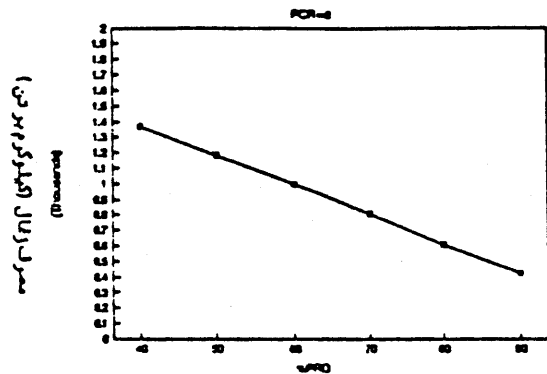
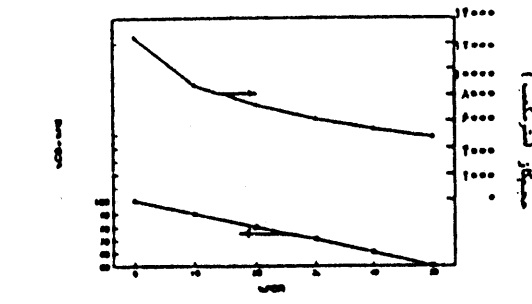
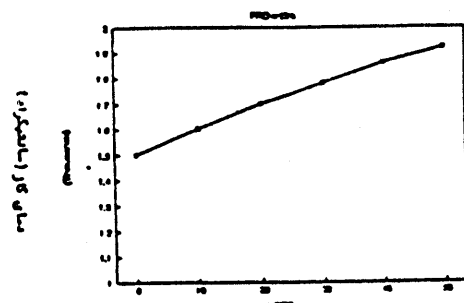
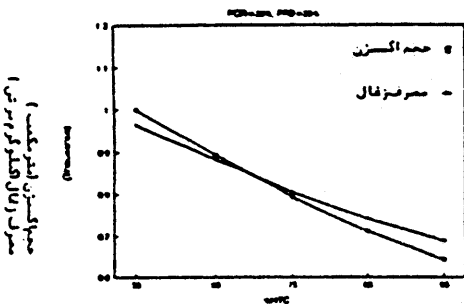
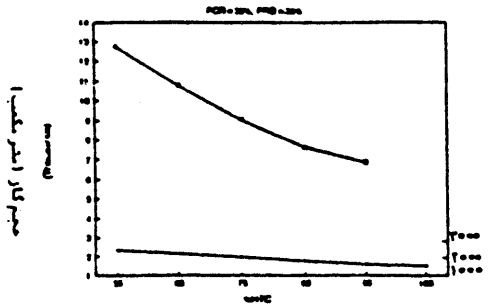
$$HTC = \frac{\text{حرارت منتقل شده به حمام}}{\text{گرمای تولید شده توسط احتراق ثانویه}} \times 100 \quad (3)$$

سپس درجه حرارت بدست آمده از حل معادلات (Tg) با درجه حرارت استفاده شده برای محاسبه ترکیبات (T · g) مقایسه می گردد. اگر مقدار مطلق تفاوت بین (Tg) و (T · g) بزرگتر از یک حد همگرایی باشد، T · g جدید انتخاب شده و کامپیوتر عملیات را تکرار می کند. در درجه حرارت های بسیار بالا (بیشتر از ۲۸۰۰) تجزیه CO₂ قابل توجه بوده و بنابراین در محاسبه ترکیب شیمیایی گاز از معادله (۴) نیز کمک گرفته می شود:

$$CO_2 = CO + 1/2O_2 \quad (4)$$

مجموع حرارت های ورودی و خروجی بر پایه مواد مصرفی و ترکیب شیمیایی گاز محاسبه و مقایسه می شوند. واضح است که اگر مقدار حرارت های ورودی و خروجی با هم مساوی نباشند مقدار زغال سنگ محاسبه شده تغییر نموده و بنابراین کامپیوتر باید محاسبه را تکرار نماید. اگر این تفاوت کمتر از حد همگرایی معینی باشد در این صورت نتایج چاپ می شوند. ورودیهای برنامه عبارتند از:

[۱۰]. همچنین اثرات کربن و سیلیسیوم بر ضریب اکتیویته گوگرد توسط ضرایب تأثیر آنها مشخص می‌شود. با توجه به معادلات ۱ تا ۷ نسبت توزیع گوگرد بین سرباره و فلز تعیین شده و از آنجا جرم گوگرد در فلز پیش‌بینی می‌شود. نتیجه محاسبات در شکل‌های ۳ و ۴ خلاصه شده است.



شکل ۴- تأثیر ضریب حرارتی و نسبت احتراق ثانویه بر دما، حجم و آنالیز گاز در یک کوره ذوب و تصفیه مستقیم براساس محاسبات الگو.

شکل ۳- تأثیر درجه احیاء اولیه، نسبت احتراق ثانویه و مقدار قراضه بر میزان مصرف زغال‌سنگ در یک کوره ذوب و تصفیه مستقیم، اطلاعات شکلها برای کوره ذوب و تصفیه مستقیم با استفاده از الگوی ساخته شده در این تحقیق محاسبه شده‌اند.

مراجع

1. W. T. Hogan, "Proceedings of Inter. Sympo. on Metall, Processes for Year 2000 and Beyond", TMS-ATME, Page 647, 1988.
2. R. J. Fruhan, "Met & Mats", p 203 April 1992.
3. W. A. Tony, "AISI Proceeds with Direct Steel making Plan" : *I & SM*, p 21-22, June 1989.
4. T. Ibaraki, et. al., "Developments of Smelting Reduction of Iron or An Approach to Commercial Iron Making" : *I & SM*, p 30-37, December 1990.
5. H. W. Cudenau, et. al., "Fluidized Bed Reduction as the Pre-Step of Smelting Reduction", *Steel Research 60*, Nos. 3 & 4, p 138-144, 1989.
6. J. Astier, "Smelting Reduction Processes Carve out an Iron Making Niche", *Steel Times*, p 84-86, February 1990.
7. R. B. Smith and M. J. Corbert, "Coal-Based Ironmaking": *I & SM*, vol. 14, No. 2, P 49-76, 1987.
8. R. Steffen, "Direct Reduction and Smelting Reduction An Overview", *Steel Research 60*, No. 3 & 4, p 96-103, 1989.
9. R. J. Fruehan, K. Ito and B. Ozturk, "Analysis of Bath Smelting Processes for Production of Iron", *I & SM*, Nov. p 83-91, 1988.
10. F. D. Richardson, "Physical Chemistry of Melts in Metallurgy", Academic Press, 1974.
11. J. C. Agarwal, "Strategic Consideration in Direct Steelmaking", *I & SM*, p 69-72, March 1991.