

شبه‌سازی ذوب و تصفیه مستقیم فولاد

دکتر خطیب‌الاسلام صدرنژاد

دانشیار دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده مهندسی متالورژی

مهندس عبدالرضا سیمچی

دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده مهندسی متالورژی

چکیده

طراحی و ساخت راکتورهای "ذوب و تصفیه مستقیم" تابع سرعت انجام تحولات فیزیکی‌وشیمیایی در قطعات غوطه‌ور در فازهای مذاب درون کوره است. ایجاد شرایط واقعی عمل برای تحقیق پیرامون نحوه و میزان تأثیر پارامترهای مربوط به طراحی کوره، انرژی و مواد بر سرعت ذوب و تصفیه شدن قطعات بسیار پرهزینه و مشکل است. لذا برای تعیین نحوه و میزان تأثیر عوامل مختلفی همچون نوع و ابعاد کوره، آنالیز مواد، نرخ بار کردن و اندازه قطعات بر سرعت تولید محصول، فرآیندهای ذوب و تصفیه در قطعات غوطه‌ور بوسیله یک الگوی ریاضی - فیزیکی شبه‌سازی شده است. شرایط عملیات به منظور دستیابی به حداکثر بازدهی در فرآیندهای گرم‌شدن، احیاء، ذوب و تصفیه تا تولید آلیاژ مطلوب برای چند نمونه واقعی از فرآیندهای ذوب و تصفیه مستقیم بررسی شده‌اند.

مقدمه

فرآیندهای انتقال حرارت، انتقال جرم، واکنش شیمیایی، واکنش الکتروشیمیایی و جریان سیال نیاز به تجزیه و تحلیل‌های دقیق موازنه جرمی - حرارتی بین مواد ورودی و خروجی با توجه به واکنشهای گرماگیر و گرمازا و سینتیک تحولات همگن و غیرهمگن درون و بیرون فازها دارد. فهرست عوامل مهم مؤثر در طراحی فرآیند در جدول ۱ ذکر شده است.

عوامل مختلفی همچون سرعت احیاء اکسیدهای آهن، درجه احیاء اولیه، نسبت احتراق ثانویه، عیار بار، نوع زغال سنگ، کف آلوده شدن سرباره و میزان تلاطم فازهای مذاب درون کوره بر بازدهی فرآیند ذوب و تصفیه مستقیم تأثیر دارند. این تأثیر به علت اندرکنشهای متقابل بین عوامل مختلف بسیار پیچیده بوده و ارزیابی دقیق آن تنها از طریق استفاده از مدل‌های کامپیوتری امکان‌پذیر است. انجام همزمان

جدول ۱- پارامترهای مؤثر در طراحی سیستم ذوب و تصفیه مستقیم

درجه احیاء اولیه سنگ معدن - بارگیری سنگ احیاء شده - استفاده از قراضه به عنوان قسمتی از بار ورودی - استفاده از انرژی الکتریکی - دمش اکسیژن و هوا با نسبتهای دلخواه - نسبت احتراق ثانویه .	ورودی	فرایند
- بازدهی انتقال حرارت از فاز گاز به فلز مذاب - درصد گرد و غبار تولید شده در راکتور - درصد اتلاف حرارت - درصد اتلاف انرژی الکتریکی در سیستمهای برقی	ورودی	راکتور
سنگ معدن - سنگ احیاء شده - قراضه - زغال سنگ - روانساز - گرد و غبار	بار	مواد
درصد FeO سرباره - درجه قلیائی بودن سرباره	غلظت	
جرم و دما	متغیر	
فلز - سرباره - دود	ماده	خروجی
وزن - حجم - دما - ترکیب شیمیائی	کمیت	

در این مقاله اثرات متقابل عوامل مؤثر در طراحی از طریق تدوین و توسعه یک برنامه جامع کامپیوتری مبتنی بر اصول ترمودینامیکی حاکم بر سیستم و موازنه‌های جرمی و حرارتی ارائه شده است.

مدل‌سازی

الف - معرفی فرآیند

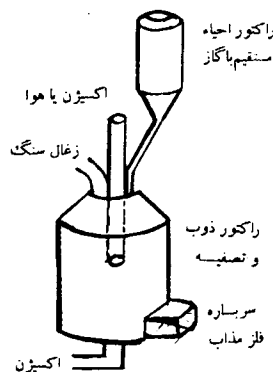
نمونه‌ای از فرآیند ذوب و تصفیه مستقیم فولاد مورد بررسی در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. این فرآیند از دو واحد اصلی یکی راکتور ذوب و تصفیه مبتنی بر روش فولادسازی اکسیژنی و دیگری واحد احیاء مستقیم با گاز تشکیل شده است. در این راکتور، مواد تغلیظ شده یا پلت‌های احیاء شده به داخل آهن مذاب پرکربن بار می‌شوند.

اکسیژن توسط دمنده‌های بالائی یا پائینی به داخل کوره دمیده شده و باعث انجام واکنشهای اکسیداسیون و تولید حرارت می‌شود. این حرارت صرف گرم و ذوب کردن مواد و انجام واکنشهای گرماگیر درون کوره خواهد شد.

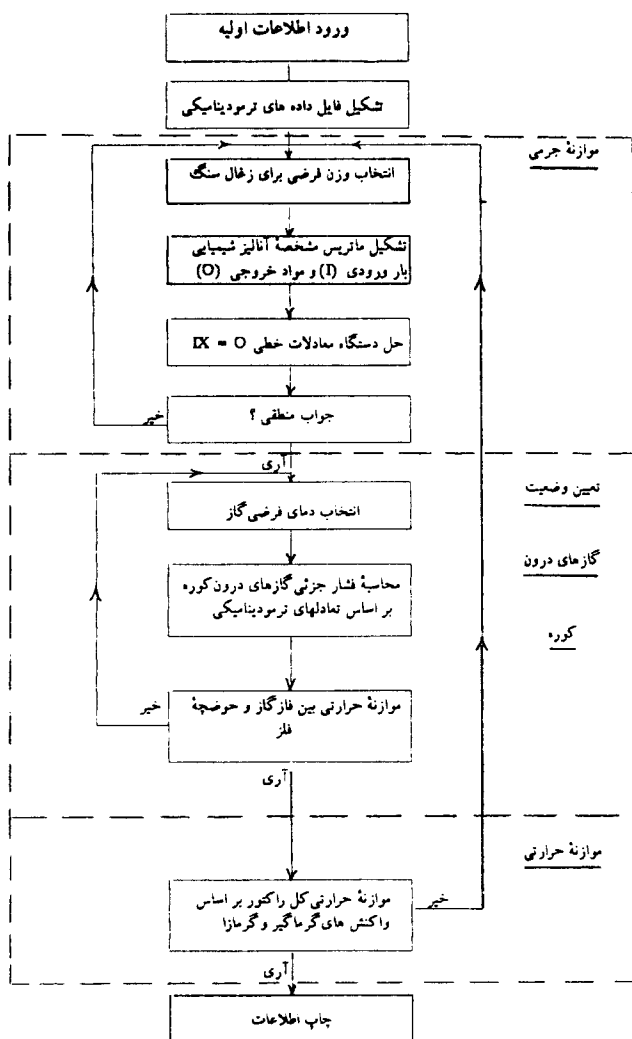
گازهای منواکسیدکربن و هیدروژن که در اثر تجزیه حرارتی و اکسید شدن زغال سنگ و احیاء سنگ معدن در فازهای موجود در بالای مذاب درون کوره تولید می‌شوند، با اکسیژن یا هوا وارد واکنش شده و حرارت آزاد شده به حمام منتقل می‌شود. این فرآیند که به احتراق ثانویه موسوم است بسیار گرمازا بوده و می‌تواند به کسری موازنه حرارتی در داخل کوره کمک کند. گاز خروجی، پس از غبارگیری و تنظیم دما، برای پیش گرم کردن و احیاء اولیه وارد

ذوب و تصفیه را نشان می‌دهد. ابتدا فایل داده‌های ترمودینامیکی (مانند حرارت محسوس مواد، تفاوت انتالپی واکنشها و ظرفیت حرارتی مواد) ایجاد می‌شود. سپس با انتخاب مقدار فرضی برای زغال سنگ بر اساس موازنه جرمی بین مواد ورودی و خروجی، ماتریس مشخصه آنالیز شیمیایی بار ورودی (I) و مواد خروجی (O) (ماتریس O) ساخته می‌شود. با حل دستگاه معادلات خطی مجهولات فرآیند شامل وزن مواد مصرف شده به ازای هر تن فلز مذاب محاسبه می‌شود:

محفظه احیاء می‌شود^(۱). مواد سنگی کانه آهن و خاکستر زغال سنگ به سرباره مذاب تبدیل شده و از آهک به عنوان روانساز استفاده می‌شود.



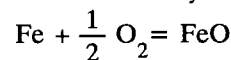
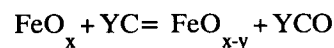
شکل ۱- نمودار تصویری فرآیند ذوب و تصفیه مستقیم فولاد که برای مدلسازی مورد استفاده قرار گرفته است.



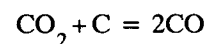
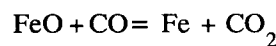
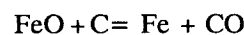
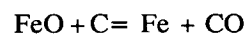
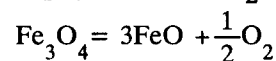
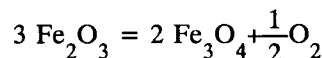
جدول ۲- واکنشهای شیمیایی مطرح شده در مدلسازی.

الف - فلز:

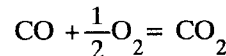
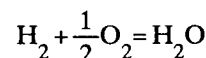
$$C = C$$



ب - سرباره:



گاز



ب - معرفی مدل

شکل ۲- نمودار گردش برنامه مدلسازی راکتور

شکل ۲- نمودار گردش برنامه مدلسازی فرایند ذوب و تصفیه مستقیم فولاد

خلاصه شده‌اند.

جدول ۳. اطلاعات اولیه استفاده شده در تحقیق.

مقدار	پارامتر
۸۵	بازدهی انتقال حرارت حاصل از احتراق ثانویه (%)
۱۰	اتلاف حرارتی راکتور به صورت درصدی از کل حرارت تولیدشده توسط واکنشهای گرمازا
۵	محتوای FeO سرباره بر حسب درصد وزنی
۱	درجه فلزایی بودن سرباره
۱۷۲۳	دمای حوضچه فلز (K)
۳/۵	درصد وزنی کربن در آهن مذاب
۱۰۷۳	دمای بار در راکتور پیش احیاء (K)

کاربرد الگو در طراحی راکتور

برنامه کامپیوتری ساخته شده در این تحقیق

می‌تواند برای طرح یک راکتور ذوب و تصفیه مستقیم بکار رود. برای مثال یک راکتور ۵ تنی با سرعت تولید ۸,۷۰۰ تن در سال را در نظر بگیرید. تجزیه شیمیایی مواد مورد استفاده در این راکتور در جدول ۵ داده شده است. این مواد عبارتند از:

(الف) سنگ آهن تغلیظ شده گل‌گوهر [۱ و ۲]،

(ب) گندله ساخته شده از سنگ معدن گل‌گوهر دارای ۷۵٪

بتونیت [۱ و ۲]،

(ج) گندله هماتیتی کم سیلیس تجارتنی [۳]،

(د) قراضه برگشتی فولاد،

(ه) کوک خارجی [۴]،

(و) نمونه کوک مصرفی ذوب آهن اصفهان [۴]،

(ز) زغال سنگ آنتراسیت [۴].

نتایج محاسبات الگو بر روی این مواد در شکل‌های

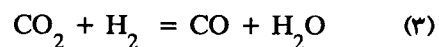
۳ تا ۷ خلاصه شده و در قسمتهای ذیل شرح داده می‌شوند:

$$IX = O \quad (1)$$

I ماتریس مشخصه آنالیز شیمیایی بار ورودی (ترکیب شیمیایی سنگ آهن، روانساز و ...) و X ماتریس مجهولهای سیستم مانند وزن بار کوره، تعداد مولهای گاز، وزن سرباره و ترکیب شیمیایی سرباره است.

فشار جزئی گازهای درون کوره با استفاده از نسبت احتراق ثانویه (معادله ۲) و ثوابت تعادل بین گازها بر اساس واکنش گاز - آب (معادله ۳) تعیین می‌شود:

$$PC = 100 \left(\frac{P_{CO_2} + P_{H_2O}}{P_{CO_2} + P_{CO} + P_{H_2O} + P_{H_2}} \right) \quad (2)$$



احتراق ثانویه گاز، شرط تعادل دمایی گاز در حوضچه فلزی را مختل می‌کند. بازدهی انتقال حرارت حاصل از احتراق ثانویه به فازهای مذاب (η_{PC}) به صورت زیر تعریف شده و برای آن مقداری ثابت در نظر گرفته می‌شود:

$$\eta_{PC} = 100 \frac{\Delta H_{PC}}{\Delta H_I} \quad (4)$$

$-\Delta H_{PC}$: حرارت حاصل از احتراق ثانویه در دمای گاز.

$-\Delta H_I$: حرارت حاصل از احتراق ثانویه در دمای فلز مذاب.

با انتخاب مقدار فرضی برای دمای گاز، ابتدا آنالیز گاز درون راکتور محاسبه می‌شود و نهایتاً با استفاده از موازنه حرارتی بین گاز، سرباره و فلز، دمای واقعی گاز در یک حلقه تکرار تعیین می‌شود. مرحله نهایی موازنه حرارتی کل راکتور است تا اینکه وزن زغال سنگ فرض شده بدرستی تعیین شود. واکنشهای شیمیایی و اطلاعات اولیه‌ای که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در جدولهای ۲، ۳، ۴

جدول ۴- اطلاعات ترمودینامیکی استفاده شده در تحقیق [۲۰]

i	$-\Delta H_f^{298}$ (Kcal/Kmol)	$C_p = a_i + b_i T/10^3 + c_i 10^5/T^2 + d_i T^2/10^6$				T(k)
		a_i	b_i	c_i	d_i	
Al ₂ O ₃	۴۰۰	۲۷/۴۳	۳/۰۶	-۸/۴۷		۲۹۸۰-۱۸۰۰
C	۰	۰/۰۲۶	۹/۳۰۷	-۰/۳۵۴	-۴/۱۵۵	۲۹۸۰-۱۸۰۰
C	...	۵/۸۴۱	۰/۱۰۴	-۷/۵۵۹		۱۱۰۰-۴۰۷۳
CO	۲۶/۴۲	۶/۷۹	۰/۹۸	-۰/۱۱		۲۹۸-۲۵۰۰
CO ₂	۹۴/۰۵	۱۰/۵۵	۲/۱۶	-۲/۰۴		۲۹۸-۲۵۰۰
CaO	۱۵۱/۶	۱۱/۸۶	۱۰/۸	-۱/۴۴		۲۹۸-۲۸۸۸
Fe	۰	۴/۱۸	۵/۹۲			۲۹۸-۱۰۳۳
Fe	...	۹				۱۰۳۳-۱۱۳۸
Fe	...	۱/۸۴	۴/۶۶			۱۱۸۳-۱۶۷۳
Fe	...	۱۰/۵				۱۶۷۳-۱۸۰۹
FeO	۶۵/۰۲	۱۲/۱۴۲	۲/۰۵۹	۰/۷۹۱		۲۹۸-۱۶۵۰
FeO	...	۱۶/۳				۱۶۵۰-۳۶۸۷
Fe ₃ O ₄	۲۶۷/۳	۲۰/۶۱۸	۴۹/۹۳۲			۲۹۸-۸۶۶
Fe ₃ O ₄	...	۴۸				۸۶۶-۱۸۷۰
Fe ₂ O ₃	۱۹۷/۳	۲۳/۴۹	۱۸/۶	-۳/۵۵		۲۹۸-۹۵۳
Fe ₂ O ₃	...	۳۶				۹۵۳-۱۰۵۳
H ₂	۰	۶/۵۲	۰/۷۸	۰/۱۲		۲۹۸-۳۰۰۰
H ₂ O	۵۷/۹۵	۷/۷۱	۲/۵۶	۰/۰۸		۲۹۸-۲۵۰۰
MgO	۱۴۳/۷	۱۱/۷۰۷	۰/۷۵۱	-۲/۷۳۴		۲۹۸-۳۰۹۸
N ₂	۰	۶/۶۶	۱/۰۲			۲۹۸-۲۵۰۰
O ₂	۰	۷/۱۶	۱	۰/۴		۲۹۸-۳۰۰۰
SiO ₂ (cry)	۲۱۷/۱	۱۱/۲۰۹	۷/۵۲۹	-۲/۴۱۲		۲۹۸-۵۴۳
SiO ₂ (cry)	...	۱۷/۱۱۹	۰/۴۵۲	-۹/۳۳۵		

جدول ۵- تجزیه شیمیایی مواد مورد استفاده در طراحی در راکتور نیمه صنعتی ۵ تنی موضوع تحقیق. ارقام جدول بر حسب درصد وزنی بیان شده‌اند.

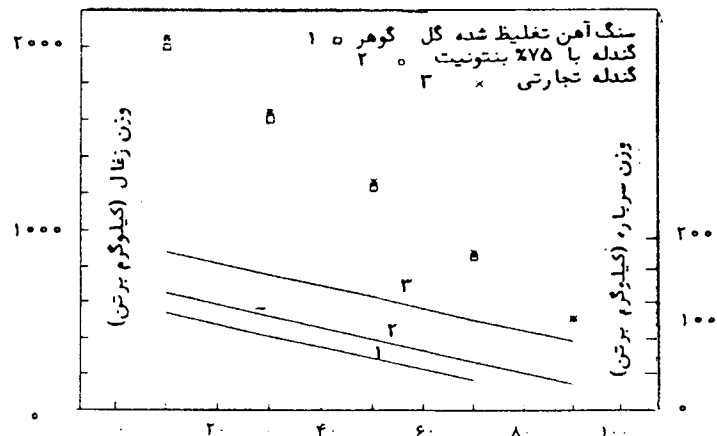
ردیف	ماده	آهن کل	ماگنیزیم	هماتیت	سیلیس	آلومینا	اکسید کلسیم	اکسید منیزیم	گوگرد	فسفر	رطوبت	کلاس	نوع	C	S	رطوبت	مواد ذرات	فاکستر	ترکیب شیمیایی خاکستر																											
																			P	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂																						
۱	پودر سنگ آهن تغلیظ شده گل گوهر	۶۸/۴	۲۵/۰	۷۲/۰	۰/۶	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۵۰	۰/۰۶	۰/۰۳	۱/۵	سنگ	ا	۸۱-۸۵	جزئی	۱-۳	۲-۴	۱۰-۱۲	۴۸-۵۴	۳۲-۴۶	جزئی	جزئی	۱۵-۳۰	جزئی	۰/۲۹	۶/۸	۱/۹	۴/۲	۲۲/۴	۵۴	۲۴/۱	۱/۳	جزئی	۰/۶	۷۵/۶	ذوب آهن اصفهان	و	۷۵-۸۵	جزئی	۰/۶	۷۵/۶	ذوب آهن اصفهان				
۲	گندله ساخته شده از سنگ گل گوهر با ۷۵٪ بنتونیت	۶۸/۶	≤ ۱/۰	۹۷/۰	۱/۱	۰/۳	۰/۱	۰/۵۰	۰/۰۳	۰/۰۳	—	معادن و	ب	۸۱-۸۵	جزئی	۱-۳	۲-۴	۱۰-۱۲	۴۸-۵۴	۳۲-۴۶	جزئی	جزئی	۱۵-۳۰	جزئی	۰/۲۹	۶/۸	۱/۹	۴/۲	۲۲/۴	۵۴	۲۴/۱	۱/۳	جزئی	۰/۶	۷۵/۶	ذوب آهن اصفهان	و	۷۵-۸۵	جزئی	۰/۶	۷۵/۶	ذوب آهن اصفهان				
۳	گندله کم سیلیس تجارتی از نوع هماتی	۶۷/۵۵	—	۹۶/۵	۲/۶۸	۰/۲۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۵	—	قراضه	ج	۸۱-۸۵	جزئی	۱-۳	۲-۴	۱۰-۱۲	۴۸-۵۴	۳۲-۴۶	جزئی	جزئی	۱۵-۳۰	جزئی	۰/۲۹	۶/۸	۱/۹	۴/۲	۲۲/۴	۵۴	۲۴/۱	۱/۳	جزئی	۰/۶	۷۵/۶	ذوب آهن اصفهان	و	۷۵-۸۵	جزئی	۰/۶	۷۵/۶	ذوب آهن اصفهان				
۴	قراضه برگشتی	C = ۰/۴	Si = ۰/۲	Mn = ۰/۵													د	۸۱-۸۵	جزئی	۱-۳	۲-۴	۱۰-۱۲	۴۸-۵۴	۳۲-۴۶	جزئی	جزئی	۱۵-۳۰	جزئی	۰/۲۹	۶/۸	۱/۹	۴/۲	۲۲/۴	۵۴	۲۴/۱	۱/۳	جزئی	۰/۶	۷۵/۶	ذوب آهن اصفهان	و	۷۵-۸۵	جزئی	۰/۶	۷۵/۶	ذوب آهن اصفهان
۵	سخت													ه	۸۱-۸۵	جزئی	۱-۳	۲-۴	۱۰-۱۲	۴۸-۵۴	۳۲-۴۶	جزئی	جزئی	۱۵-۳۰	جزئی	۰/۲۹	۶/۸	۱/۹	۴/۲	۲۲/۴	۵۴	۲۴/۱	۱/۳	جزئی	۰/۶	۷۵/۶	ذوب آهن اصفهان	و	۷۵-۸۵	جزئی	۰/۶	۷۵/۶	ذوب آهن اصفهان			
۶	کوک													و	۸۵-۹۰	جزئی	۲-۴	۴-۶	۴-۵	۳۳-۳۷	۲۶-۲۷	۵-۷	۱-۳	۱۹-۲۳	۰/۴-۱/۳	۱۹-۲۳	۱-۳	۵-۷	۲۶-۲۷	۳۳-۳۷	۴-۵	۴-۶	۲-۴	جزئی	۸۵-۹۰	ذوب آهن اصفهان	ز	۸۵-۹۰	ذوب آهن اصفهان	ز	۸۵-۹۰	ذوب آهن اصفهان				

احیاء اولیه می‌تواند منجر به کاهش مصرف سوخت و نتیجتاً کاهش هزینه‌های تولید فلز مذاب شود، اما به علت کاسته شدن از ضخامت قشر سرباره که نقش محافظ را برای فلز مذاب داشته و محمل انجام واکنشها برای تولید و تصفیه فلز است [۵، ۶]، خطر اکسیدشدن مجدد فلز و تنزل میزان و سرعت تولید بوجود می‌آید.

مقایسه منحنیهای شکل ۳ نشان می‌دهد که تغییر نوع سنگ معدن تأثیر چندانی بر میزان مصرف زغال سنگ ندارد. اما در صورت افزایش مواد سنگی همراه، مقدار سرباره تولید شده نیز بالطبع اضافه خواهد شد و این موضوع در مورد سنگهای وارداتی (ماده ج جدول ۵) در منحنی مربوط در شکل ۳ دیده می‌شود. از طرف دیگر با توجه به پیچیدگی الگوهای مربوط به تأثیر اندازه و شکل مواد مصرفی بر سرعت واکنشهای شیمیایی و انتقال حرارت در کوره ذوب و تصفیه مستقیم، برای سهولت از این نوع تفاوتها در محاسبات فعلاً صرفنظر می‌شود.

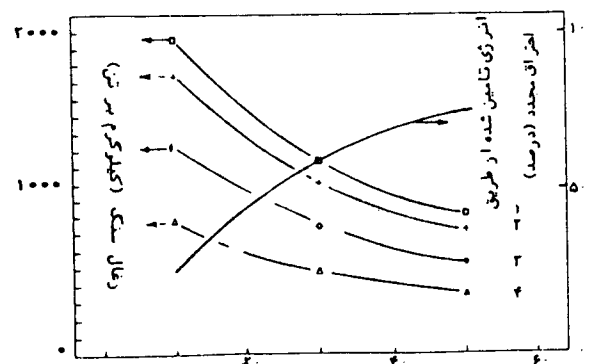
ب - نسبت احتراق ثانویه

احیاء اکسید آهن و گازی شدن زغال سنگ هر دو باعث تولید مقادیر قابل توجهی گاز در راکتور ذوب و تصفیه مستقیم می‌شوند. دما و پتانسیل احیائی این گاز نسبتاً بالا بوده و در نتیجه احیای سنگ آهن تا درصدهای بالا توسط گاز امکان پذیر است. راه دیگر برای بازیابی انرژیهای حرارتی و شیمیائی گاز کنترل فشار جزئی اکسیژن داخل راکتور به منظور احتراق درصدی از CO و H_2 موجود در گاز و تأمین قسمتی از انرژی حرارتی مورد نیاز راکتور است (شکل ۴). این تحول که به احتراق ثانویه معروف است، سبب کاهش مصرف زغال سنگ نوع آنتراسیت هنگام ذوب و تصفیه گندله‌های دارای ۷۵ درصد بنتونیت با بازدهی حرارتی ۸۵



در صد احیاء اولیه سنگ آهن

شکل ۳- تأثیر افزایش درجه احیاء اولیه بر مصرف آنتراسیت و تولید سرباره در غياب احتراق ثانویه. (نقاط روی شکل از محور سمت چپ و خطوط پر از محور سمت راست خوانده می‌شوند.)



نسبت احتراق ثانویه (درصد)

شکل ۴- اثر نسبت احتراق ثانویه بر میزان مصرف زغال سنگ آنتراسیت و درصد انرژی تأمین شده از احتراق ثانویه گاز. درصد احیاء اولیه و دمای بار در راکتور پیش احیاء به ترتیب: ۱- ۲۵، ۲- ۵۰ و ۳- ۸۰۰، ۴- ۸۰۰ و ۵- ۶۰۰ و ۶- ۸۰۰ بوده است.

الف: درجه احیاء اولیه

شکل ۳ نشان می‌دهد که افزایش درجه احیاء اولیه سبب کاهش مصرف زغال سنگ و وزن سرباره می‌شود. باید توجه داشت که این محاسبات مربوط به شرایطی است که در آن احتراق ثانویه وجود نداشته باشد. پتانسیل احیائی گازهای CO و H_2 در راکتور ذوب و تصفیه مستقیم در این حالت حداکثر است. اگر چه بر اساس این منحنیها، افزایش درجه

ج - بازدهی انتقال حرارت

بازدهی انتقال حرارت از فاز گاز به فازهای مذاب درون کوره به شدت تلاطم مذاب، نوع و مشخصات زغال سنگ بارشده و تعداد، مکان و طرح دمنده‌های اکسیژن بستگی دارد. برای افزایش میزان تلاطم، می‌توان اکسیژن دمیده شده را با گاز CO_2 یا N_2 مخلوط کرده و عمل دمش را نیز از کف انجام داد. تحقیقات انجام شده در کوره نیمه‌صنعتی [۸] نشان داده است که با افزایش شدت تلاطم به بیش از ۲ کیلووات بر تن، بازدهی انتقال حرارت می‌تواند از مرز ۹۰ درصد بگذرد. افزایش بازدهی انتقال حرارت به بازیابی حرارت محسوس گازها کمک کرده و از مشکل ورود گاز داغ به راکتور احیاء مستقیم می‌کاهد.

تأثیر نسبت احتراق ثانویه بر بازدهی انتقال حرارت را می‌توان با کمک موازنه حرارتی در کوره‌های واقعی ذوب و تصفیه مستقیم بدست آورد. این تأثیر برای کوره ۵ تنی نیمه‌صنعتی مورد اشاره در مرجع ۹ به صورت رابطه ۵ قابل تعیین است:

$$\eta_{pc} = 100 - 90 \left(\frac{PCR}{100} \right)^{0.9} \frac{1}{P} \quad (5)$$

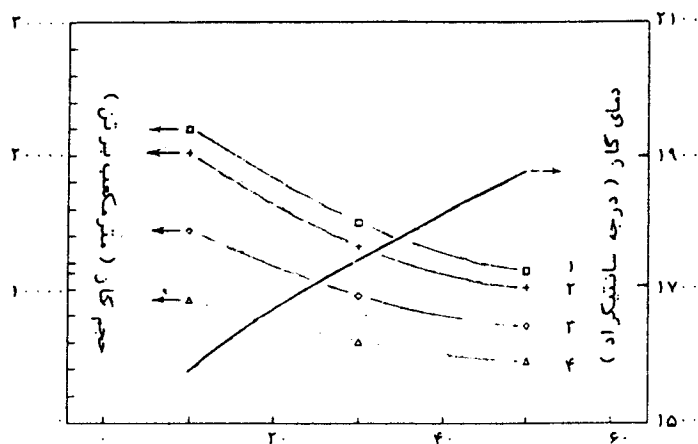
که در آن P کمیتی است تجربی نشان‌دهنده تعداد دمنده‌های اکسیژن، وسعت منطقه احتراق ثانویه در فاز سرباره و سرعت ظاهری گاز.

رابطه ۵ به وضوح نشان می‌دهد که برای دستیابی به یک بازدهی حرارتی معین، لازم است دو کمیت PCR و P را بنحوی کنترل کرد که با افزایش نسبت احتراق ثانویه از بازدهی حرارتی کاسته نشود (شکل ۶). مثلاً در صورت افزایش PCR، لازم است تعداد و سطح پوشش دمنده‌های اکسیژن در فاز سرباره نیز بیشتر شود. بنابراین به نظر می‌رسد که در طراحی راکتورهای ذوب و تصفیه مستقیم تعداد و

درصد در شکل ۴ شده است.

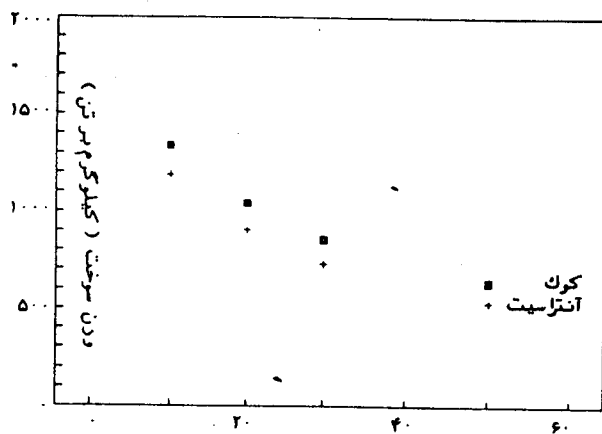
باید توجه داشت که استفاده از انرژی حاصل از احتراق ثانویه منوط به انتقال سریع حرارت از فاز گاز به حوضچه فلز و سرباره است. آزمایشهای انجام شده در مقیاس نیمه صنعتی توسط سایر محققین [۷ و ۸] نشان داده است که بازدهی انتقال حرارت از فاز گاز با افزایش نسبت احتراق ثانویه کاهش می‌یابد. از حجم و پتانسیل گاز خروجی نیز بر اساس ارقام حاصل از این تحقیق با افزایش نسبت احتراق ثانویه کاسته می‌شود در حالی که با اضافه شدن نسبت احتراق ثانویه، دمای گاز فزونی می‌یابد (شکل ۵).

اضافه شدن دمای گاز توأم با کاهش بازدهی انتقال حرارت در اثر افزایش نسبت احتراق ثانویه می‌تواند اختلافاتی را در کار راکتورهای ذوب و تصفیه مستقیم به وجود آورد. برای مثال دمای طراحی شده کوره‌های احیاء مستقیم که معمولاً بین ۸۵۰ تا ۸۵۰ درجه سانتیگراد است، با استفاده از گازهای داغ خروجی راکتور ذوب می‌تواند دستخوش تغییر و نوسان شود. در عوض استفاده از گازهای محترق شده با پتانسیل حیاتی کم در کوره‌های احیاء مستقیم، می‌تواند لزوم افزایش دبی و تغییر ترکیب شیمیایی را خاطر نشان سازد.



نسبت احتراق ثانویه (درصد)

شکل ۵- اثر نسبت احتراق ثانویه بر حجم و درجه حرارت گاز خارج شده از راکتور. درصد احیاء اولیه و دمای بار در راکتور پیش احیاء بترتیب: ۱- ۲۵ و ۲- ۳۰، ۳- ۳۵ و ۴- ۴۰ و ۵- ۸۰۰ بوده است.



درصد احتراق ثانویه

شکل ۷- اثر درصد احتراق ثانویه بر مصرف کوک ذوب آهن و زغال سنگ آنتراسیت برای باری که ۳۰٪ پیش احیاء شده است.

شرایط بهینه اقتصادی

بمنظور دستیابی به شرایط بهینه فرایند ذوب و تصفیه مستقیم از نظر اقتصادی، محاسبات الگو را می‌توان برای مواد مصرفی و شرایط متفاوت تکرار کرده و نتایج را با هم مقایسه کرد. برای مثال ارزیابی تأثیر نوع سوخت بر هزینه فرایند منجر به نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۸ و ۹ می‌شود. این محاسبات برای دو راکتور ۵ تنی تحت شرایط زیر انجام شده است:

راکتور اول:

درجه احیاء اولیه ۳۰ درصد و نسبت احتراق ثانویه ۵۰ درصد است.

راکتور اول:

درجه احیاء اولیه ۶۰ درصد و نسبت احتراق ثانویه ۳۰ درصد است.

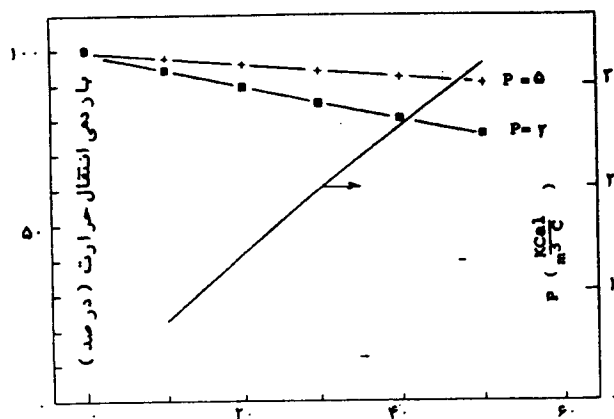
هزینه‌های نسبی بر اساس ثابت بودن نسبت‌های دو به دوی قیمت سوختها تعیین و ترسیم شده است. برای مثال اگر قیمت کوک وارداتی تا ۲۰ درصد بیشتر از قیمت کوک

ارتفاع دمنده‌های اکسیژن از سطح سرباره حائز اهمیت بسیاری می‌باشد که لازم است به آن توجه شود.

د- انتخاب سوخت

نوع سوخت بارشده بر بازدهی انتقال حرارت و میزان سوخت تأثیر دارد. یک نمونه از این نوع تأثیر در شکل ۷ نمایش داده شده است. اگر چه دستیابی به بازدهی حرارتی صددرصد در شرایط عملی غیر ممکن به نظر می‌رسد، لکن با تغییر نوع سوخت و شرایط احتراق ثانویه ممکن است بتوان صرفه‌جویی قابل توجهی در میزان مصرف سوخت به وجود آورد. برای مثال اطلاعات شکل ۷ نشان می‌دهد که استفاده از زغال سنگ آنتراسیت به جای کوک ذوب آهن اصفهان می‌تواند باعث کاهش مصرف سوخت شود. البته مقدار تفاوت با افزایش نسبت احتراق ثانویه، مرتباً کوچکتر می‌شود.

در اینجا باید توجه کرد که کاهش مصرف سوخت ضرورتاً به معنای اقتصادی‌تر شدن فرایند نیست زیرا قیمت‌های مواد مصرفی و هزینه حمل و نقل، نقش اساسی در هزینه‌های فرایند دارند. علیهذا لازم است آزمایشهای حساسیت الگو با توجه به شرایط واقعی فرایند به منظور دستیابی به شرایط بهینه انجام شود.

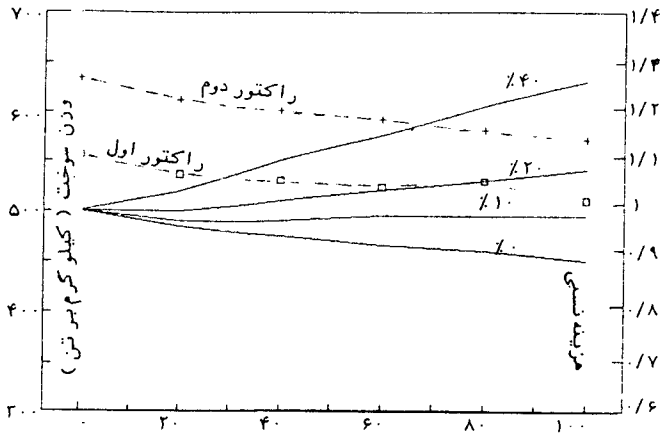


درصد احتراق ثانویه

شکل ۸- اثر درصد احتراق ثانویه و مقدار P بر بازدهی انتقال حرارت.

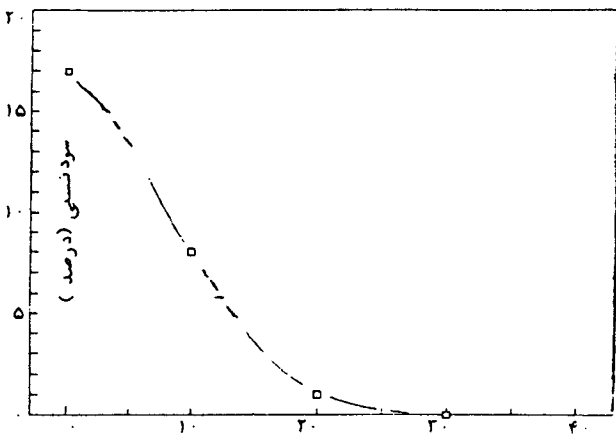
ذوب آهن اصفهان باشد، استفاده از کوک اولی می تواند مقرون به صرفه باشد. ولی اگر این افزایش به ۳۰ درصد برسد، استفاده از کوک ذوب آهن اصفهان اقتصادی تر خواهد بود. منحنیهای شکلهای ۸ و ۹ مصرف سوخت راکتور اول را ۷۰ تا ۸۰ کیلوگرم بر تن فلز مذاب کمتر از مصرف سوخت در راکتور دوم نشان می دهد.

اثر مخلوط کردن سوختها بر سود نسبی فرایند در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. از این نوع اطلاعات می توان برای انتخاب بهترین مخلوط سوختها با توجه به قیمت انواع سوخت در بازار جهانی بهره جست. نمونه دیگری از این نوع اطلاعات در شکل ۱۱ نشان داده شده است که در آن مازاد سود نسبی برای راکتوری با تولید ۵۰۰،۰۰۰ تن فلز مذاب در سال بر حسب قیمت کوک ذوب آهن اصفهان رسم شده است. اطلاعات شکل میزان فایده حاصل از مخلوط کردن را در صورت افزایش قیمتهای داخلی آشکار می سازد.



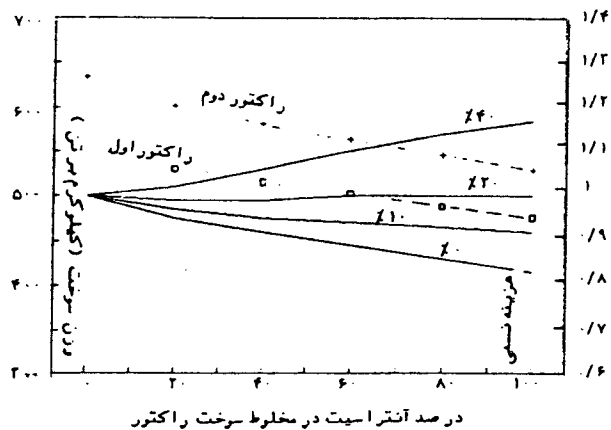
درصد کوک وارداتی در مخلوط سوخت راکتور

شکل ۹- اثر درصد کوک وارداتی در مخلوط با کوک ذوب آهن بر مصرف سوخت و هزینه نسبی فرایند. خطوط درصد هزینه ثابت برای راکتور دوم ترسیم شده است.



قیمت نسبی آنتراسیت به کوک ذوب آهن (%)

شکل ۱۰- اثر قیمت نسبی آنتراسیت به کوک ذوب آهن اصفهان بر سود حاصل از افزایش آنتراسیت در مخلوط سوخت.



درصد آنتراسیت در مخلوط سوخت راکتور

شکل ۸- اثر درصد زغال سنگ آنتراسیت در مخلوط با کوک ذوب آهن اصفهان بر مصرف سوخت و هزینه نسبی فرایند. خطوط درصد هزینه ثابت برای راکتور دوم ترسیم شده است.

سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف به خاطر حمایت مالی از تحقیق سپاسگزاری می‌شود.

فهرست منابع

۱- ناصر توحیدی، "احیاء مستقیم" جلد دوم، (۱۳۶۷) صفحه ۲۵.

2- Esfahan Steel-Works Long Products, Project Plan, Volume II, Assesment of Plant Alternatives. British Steel Corporation, 71.3, (Cited by Ref. 1).

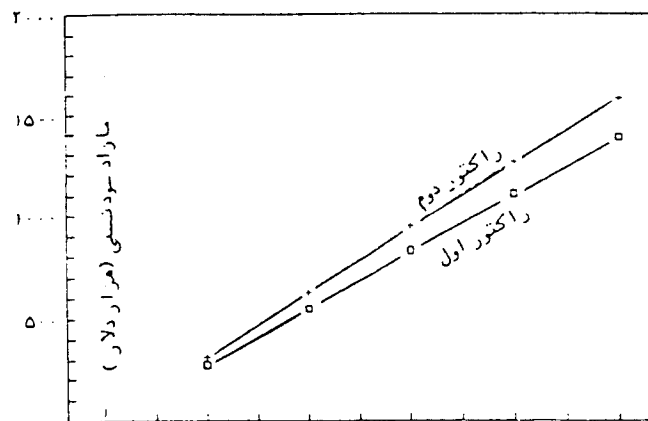
۳- ناصر توحیدی، "جزوه احیاء مستقیم"، دانشکده فنی دانشگاه تهران (۱۳۶۴)، صفحه ۳۵۰.

۴- "فرو سیلیسیوم"، دفتر طرح و تحقیق شرکت صنایع فرو آلیاژ ایران، (۱۳۷۰).

5- T. Ibaraki, M. Kanemoto, S. Ogata, H. Katayama and H. Ishikawa, "Development of Smelting Reduction of Iron Ore - An Approach to Commerical Ironmaking": I&SM. (December 1990), 30-37.

6- Y. Kishimoto, K. Yamaguchi, S. Takeuchi, Y. Sakuraya and T. Fujii, "Smelting Reduction of Iron, 37.

7- H. Katayama, T. Ohno, M. Yamauchi, M. Matsuo, T. Kawamura and T. Ibaraki, "Mechanism of Iron Oxide Reduction and Heat Transfer in the Smelting Reduction Process with a Thick Layer of Slag": Ore, "5 ton Test Converter": ISIJ International, Vol. 32 (1992), 95-101.



قیمت تمام‌شده کوک ذوب آهن (دلار بر تن)

شکل ۱۱- مازاد سود نسبی که در اثر مخلوط کردن کوک ذوب آهن با آنتراسیت به نسبت ۶۰ به ۴۰ برای طراحی یک راکتور با ظرفیت ۵۰۰۰۰۰ تن در سال بدست می‌آید. قیمت دو نوع سوخت یکسان فرض شده است.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

شبه‌سازی فرایند ذوب و تصفیه مستقیم می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در خصوص میزان مصرف و نوع سوخت، سرعت بارگیری و میزان تولید فلز مذاب، انتخاب نوع و میزان مواد خام و شرایط بهینه به کارگیری راکتور بدست دهد. به ویژه آنکه با توجه به پیچیدگی‌های فراوان فرایند، امکان آزمایش‌های عملی قبل از رسیدن به جواب‌های قابل قبول از طریق محاسبات الگو، کاری دشوار و پرهزینه است.

الگوی ریاضی ساخته شده در این تحقیق می‌تواند کمک شایانی برای دستیابی به اطلاعات مورد نیاز در مورد فرایند ذوب و تصفیه مستقیم از طریق پیش‌بینی عملکرد راکتور تحت شرایط اجرایی گوناگون بدست دهد. نتایج محاسبات می‌تواند در عملیات طراحی و به کارگیری راکتور بکار رود.

8- T. Hirata, M. Ishikawa and S. Anezaki, "Stirring Effect in Bath-Smelting Furnace with Combined Blowing of Top and Side Blown Oxygen and Bottom Blown Nitrogen": ISIJ International, 32, 1, (1992), 95-101. Vol.

9-K.Takahashi, M. Muroya, K.Kondo, T. Hasegawa, I.Kikuchi and M. Kawakami, "Post Combustion Behaviour in In-bath Type Smelting Reduction Furnace": ISIJ International, Vol. 32, 1(1992), 102-110.