

ذوب و تصفیه مستقیم

خطیب‌الاسلام صدرنژاد (دانشیار)

عبدالرضا سیم‌چی

دانشکده مهندسی متالورژی

چکیده

طراحی و ساخت راکتورهای «ذوب و تصفیه مستقیم» تابع سرعت انجام تحولات فیزیکوشیمیایی در قطعات غوطه‌خور 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، سرعت بار کردن و اندازه قطعات بر سرعت تولید محصول، فرایندهای ذوب و تصفیه در قطعات غوطه‌خور به‌وسیله یک الگوی ریاضی-فیزیکی شبیه‌سازی شده است. شرایط بهینه عملیات به منظور دستیابی به حداکثر بازدهی در فرایندهای گرم شدن، احیاء، ذوب و تصفیه تا تولید آلیاژ مطلوب برای چند نمونه واقعی از فرایندهای ذوب و تصفیه مستقیم بررسی شده‌اند.

مقدمه

عوامل مختلفی همچون سرعت احیای اکسیدهای آهن، درجه احیای اولیه، نسبت احتراق ثانویه، عیار بار، نوع زغال‌سنگ، کف آلود شدن سرباره و میزان تلاطم فازهای مذاب درون کوره بر بازدهی فرایند 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

جدول ۱ پارامترهای مؤثر در طراحی سیستم ذوب و تصفیه مستقیم

فرایند	ورودی	درجه احیای اولیه سنگ معدن- بارگیری سنگ احیاء شده استفاده از فراضه به عنوان قسمتی از بار ورودی- استفاده از انرژی الکتریکی- دمنش اکسیژن و هوا با نسبتهای دلخواه- نسبت احتراق ثانویه.
راکتور	ورودی	- باردهی انتقال حرارت از فاز گاز به فاز مذاب - درصد گردوغبار تولید شده در راکتور - درصد افت حرارت - درصد افت انرژی الکتریکی در سیستمهای برقی
مواد	ورودی	سنگ معدن- سنگ احیاء شده- فراضه- زغال- سنگ روانساز- گردوغبار
		درصد FeO سرباره- درصد قلبایی بودن سرباره
	خروجی	مغز و دما
		ماده
	گداز	وزن - حجم - دما - ترکیب شیمیایی

است. انجام همزمان فرایندهای 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 فرایند در جدول ۱ ذکر شده است. در این تحقیق 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 بررسی شده است. در انجام این مقصود فرضهای ساده شده زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

- ۱- محل گرم شدن، ذوب شدن و حذف شدن مواد فرار موجود در زغال سنگ متعلقه فعال ذوب و تصفیه داخل سرباره است.
- ۲- فشار جزئی گازهای درون کوره با استفاده از نسبت احتراق ثانویه^۱ (معادله ۱) و ثوابت تعادل بین گازها تعیین می‌شود:

$$PCR = 100 \left(\frac{P_{CO_2} + P_{H_2O}}{P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{CO} + P_{H_2}} \right) \quad (1)$$

۳- باردهی انتقال حرارت حاصل از احتراق ثانویه به فازهای مذاب (η_{pc}) به نسبت احتراق ثانویه بستگی نداشته و به صورت عددی ثابت در نظر گرفته می‌شود.

$$\eta_{pc} = 100 \left(\frac{\Delta H_{pc}}{\Delta H_f} \right) \quad (2)$$

1. PCR

ΔH_{pe} : حرارت حاصل از احتراق ثانویه در دمای گاز.

ΔH_f : حرارت حاصل از احتراق ثانویه در دمای فلز مذاب.

۴- ده درصد از کل حرارت تولید شده توسط واکنشهای گرمازا و ده درصد از الکتریسیته مصرفی به عنوان اتلاف انرژی راکتور فرض می‌شود.

۵- محتوای FeO سرباره در شرایط عمل ثابت است.

کاربرد الگو در طراحی راکتور

برنامه کامپیوتری ساخته شده در این تحقیق می‌تواند برای طرح یک راکتور ذوب و تصفیه مستقیم به کار رود. برای مثال یک راکتور ۵ تنی با سرعت تولید ۸۷۰۰ تن در سال را در نظر بگیرید. تجزیه شیمیایی مواد مورد استفاده در این راکتور در جدول ۲ داده شده است. این مواد عبارتند از:

الف) سنگ آهن تغلیظ شده گل گوهر [۱ و ۲].

ب) گندله ساخته شده از سنگ معدن گل گوهر دارای ۰٫۷۵ درصد بنتونیت [۱ و ۲].

ج) گندله هماتیته کم سیلیس تجارتهی [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 ۱ تا ۵ خلاصه شده و در قسمتهای ذیل شرح داده می‌شوند.

درجه احیای اولیه

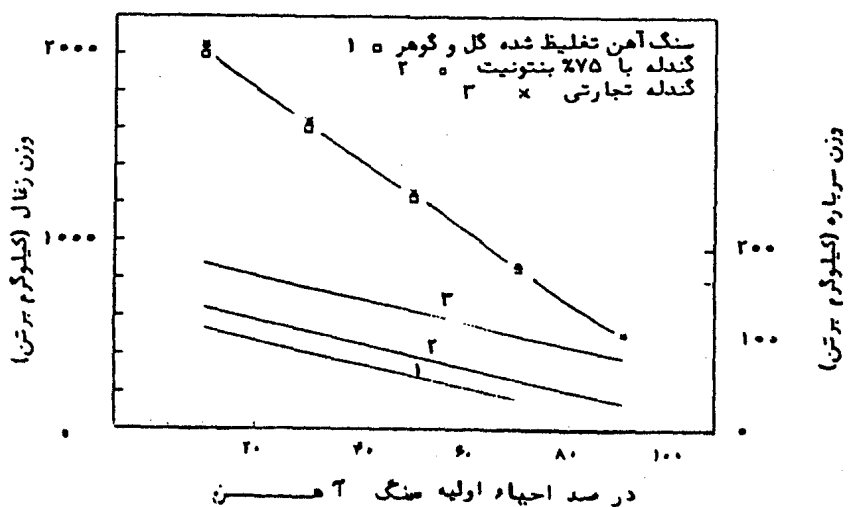
شکل ۱ نشان می‌دهد که افزایش درجه احیاء اولیه سبب کاهش مصرف زغال سنگ و وزن سرباره می‌شود. باید توجه داشت که این محاسبات مربوط به شرایطی است که در آن احتراق ثانویه وجود نداشته باشد. پتانسیل احیایی گازهای CO و H₂ در راکتور ذوب و تصفیه مستقیم در این حالت حداکثر است. اگر چه بر اساس این منحنیها، افزایش درجه احیای 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 و ۶]، خطر اکسید شدن مجدد فلز و تنزل میزان و سرعت تولید به وجود می‌آید. مقایسه منحنیهای شکل ۱ 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 ۲) در منحنی مربوط در شکل ۱ 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 صرف نظر می‌شود.

جدول ۲ تجزیه شیمیایی مواد مورد استفاده در طراحی دراکتور نیمه صنعتی ۵ تنی موضوع تحقیق.

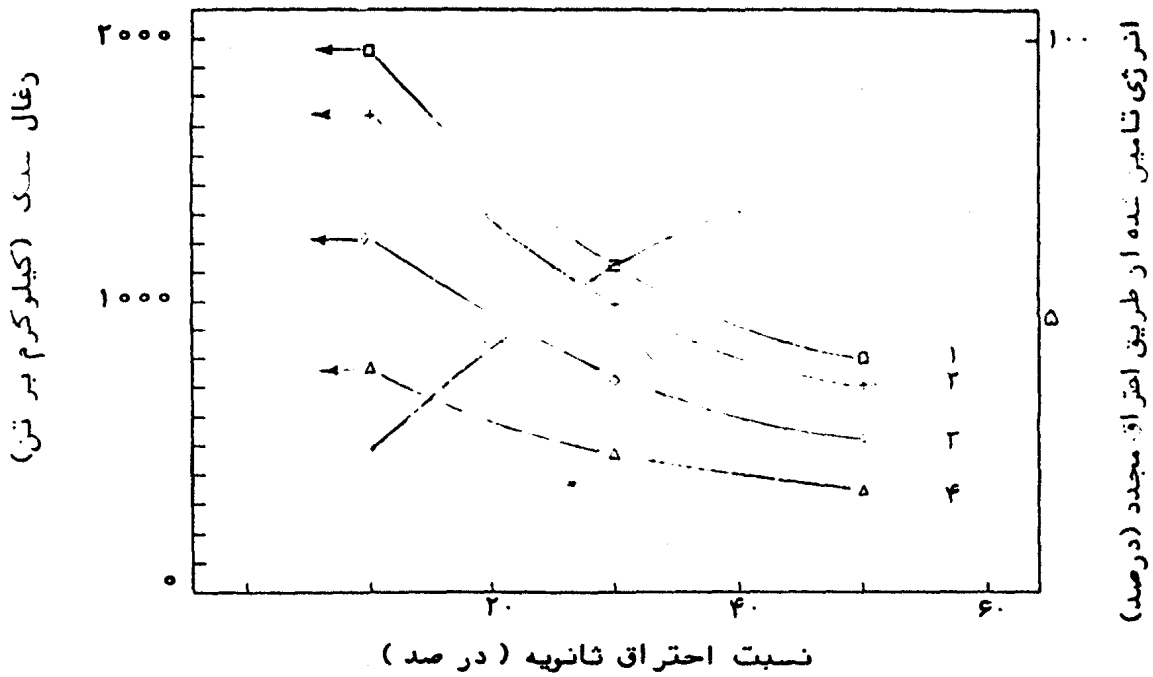
آهن	ماده	آهن کل	ماگنتیت	هماتیت	سیلیس	آلومینا	اکسید کلسیم	اکسید منیزیم	گوگرد	فسفر	رطوبت	ساخت		نوع																																																			
												C	S	رطوبت مواد	خاکستر																																																		
الف	پودر سنگ آهن تخلیظ شده گل و گوهر	۶۸٫۴	۲۵٫۰	۷۲٫۰	۰٫۶	۰٫۱۵	۰٫۱۰	۰٫۵۰	۰٫۰۶	۰٫۰۳	۱٫۵	۱۱-۸۵	وارداتی	کوک	ذوب آهن اصفهان	۰٫۲۹	۶٫۸	۱٫۹	۴٫۲	۲۲٫۴	۵۴	۲۴٫۱	۱٫۳	*	۰٫۶	۷۵٫۶	۰٫۲۱	۱۹	۱۱	۱-۲	۵-۷	۲۶-۲۷	۳۳-۳۷	۴-۵	۴-۶	۲-۳	*	۸۵-۹۰	۱۱-۸۵	وارداتی	کوک	ذوب آهن اصفهان	۰٫۲۱	۶٫۸	۱٫۹	۴٫۲	۲۲٫۴	۵۴	۲۴٫۱	۱٫۳	*	۰٫۶	۷۵٫۶	۰٫۲۱	۱۹	۱۱	۱-۲	۵-۷	۲۶-۲۷	۳۳-۳۷	۴-۵	۴-۶	۲-۳	*	۸۵-۹۰
ب	گندله ساخته شده از سنگ گل و گوهر با ۷۵٪ بنتونیت	۶۸٫۶	۱٫۰	۹۷٫۰	۱٫۱	۰٫۳	۰٫۱	۰٫۵۰	۰٫۰۳	۰٫۰۳	-	۸۱-۸۵	وارداتی	کوک	ذوب آهن اصفهان	۰٫۲۱	۶٫۸	۱٫۹	۴٫۲	۲۲٫۴	۵۴	۲۴٫۱	۱٫۳	*	۰٫۶	۷۵٫۶	۰٫۲۱	۱۹	۱۱	۱-۲	۵-۷	۲۶-۲۷	۳۳-۳۷	۴-۵	۴-۶	۲-۳	*	۸۵-۹۰																											
ج	گندله کم سیلیس تجارتی از نوع هماتیتی	۶۷٫۵۵	-	۹۶٫۵	۲٫۶۸	۰٫۲۹	۰٫۱۹	۰٫۱۱	۰٫۰۹	۰٫۰۰۵	-	۸۱-۸۵	وارداتی	کوک	ذوب آهن اصفهان	۰٫۲۱	۶٫۸	۱٫۹	۴٫۲	۲۲٫۴	۵۴	۲۴٫۱	۱٫۳	*	۰٫۶	۷۵٫۶	۰٫۲۱	۱۹	۱۱	۱-۲	۵-۷	۲۶-۲۷	۳۳-۳۷	۴-۵	۴-۶	۲-۳	*	۸۵-۹۰																											
د	قراضه برگشتی	C = ۰٫۴ Si = ۰٫۲ Mn = ۰٫۵											۸۱-۸۵	وارداتی	کوک	ذوب آهن اصفهان	۰٫۲۱	۶٫۸	۱٫۹	۴٫۲	۲۲٫۴	۵۴	۲۴٫۱	۱٫۳	*	۰٫۶	۷۵٫۶	۰٫۲۱	۱۹	۱۱	۱-۲	۵-۷	۲۶-۲۷	۳۳-۳۷	۴-۵	۴-۶	۲-۳	*	۸۵-۹۰																										

ارقام جدول بر حسب درصد وزنی بیان شده‌اند.

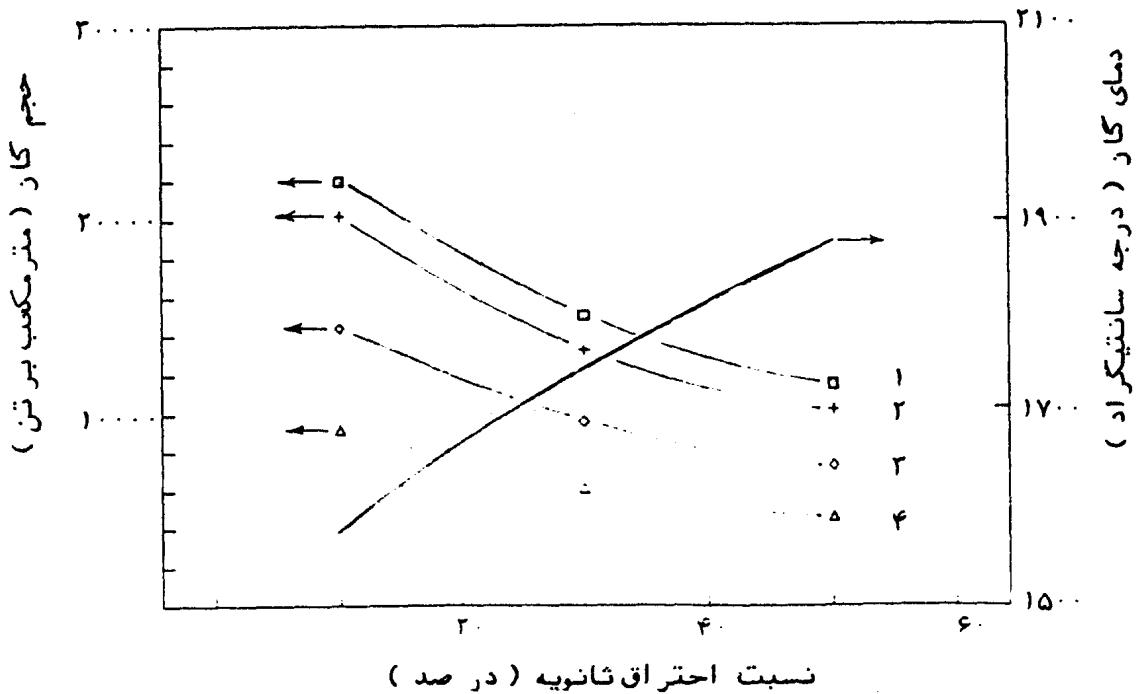
* جزئی



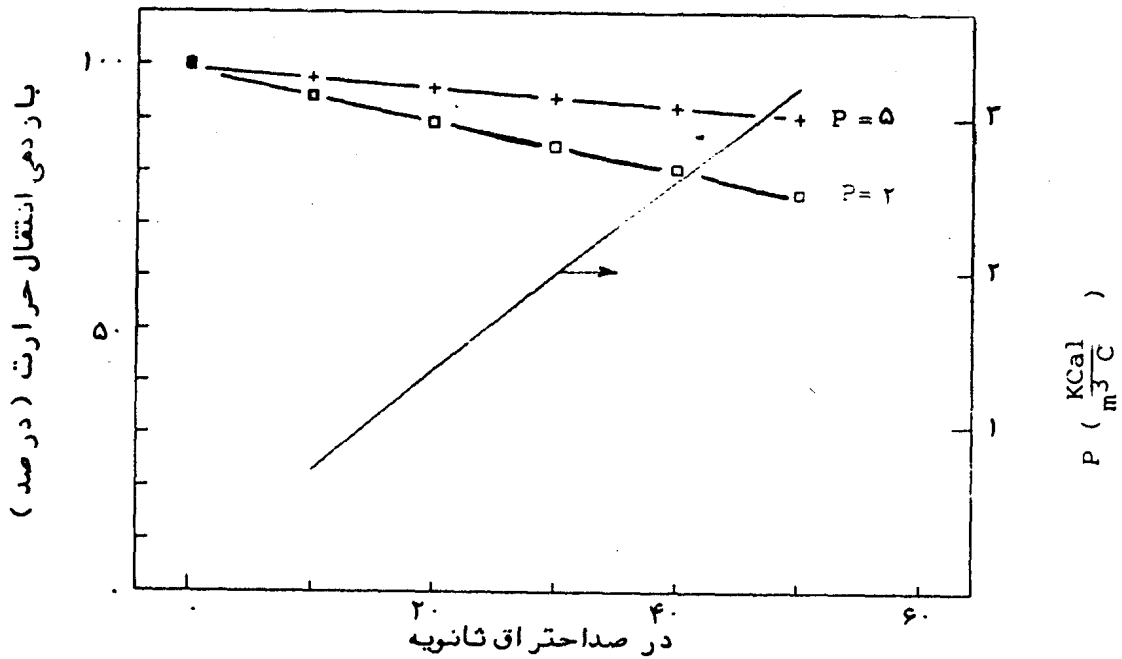
شکل ۱ تأثیر افزایش درجه احیاء اولیه بر مصرف آنتراسیت و تولید سرباره در غیاب احتراق ثانویه. نقاط روی شکل از محور سمت چپ و خطوط بر از محور سمت راست خوانده می‌شوند.



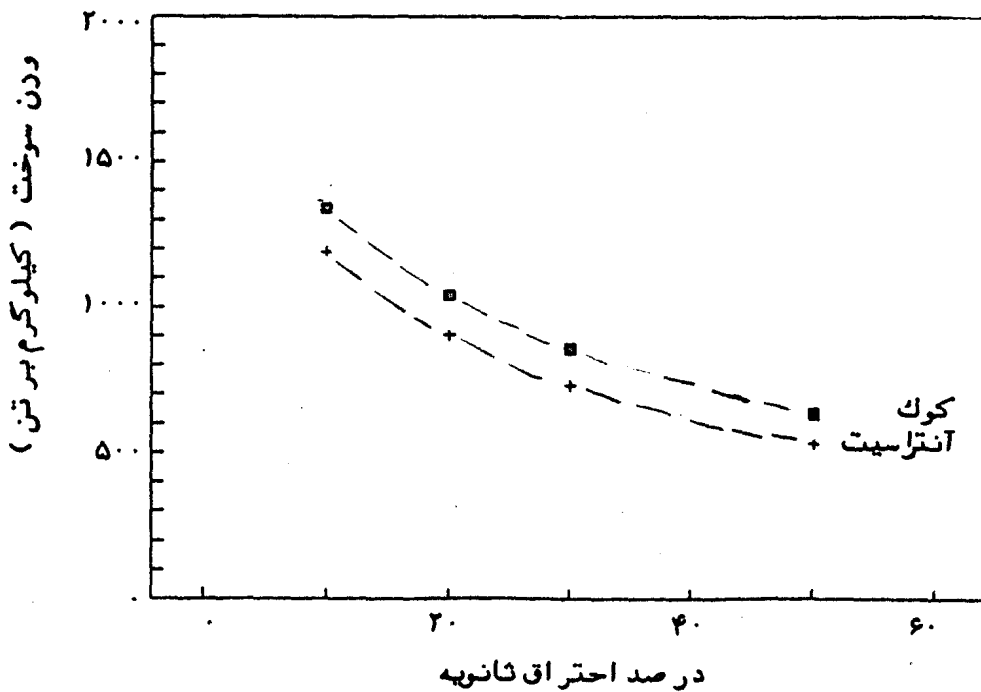
شکل ۲ اثر نسبت احتراق ثانویه بر میزان مصرف زغال سنگ آنتراسیت و درصد انرژی تامین شده از احتراق ثانویه گاز. درصد احیاء اولیه و دمای بار در راکتور پیش احیاء به ترتیب: ۱-۰-۲۵، ۲-۰-۲۵، ۳-۸۰۰ و ۴-۶۰-۸۰۰ و ۸۰۰ بوده است.



شکل ۳ اثر نسبت احتراق ثانویه بر حجم و درجه حرارت گاز خارج شده از راکتور. درصد احیاء اولیه و دمای بار در راکتور پیش احیاء به ترتیب: ۱-۰-۲۵ و ۲-۰-۲۵ و ۳-۸۰۰ و ۴-۶۰-۸۰۰ و ۸۰۰ بوده است.



شکل ۴ اثر درصد احتراق ثانویه و مقدار p بر بارزدهی انتقال حرارت.



شکل ۵ اثر درصد احتراق ثانویه بر مصرف کوک ذوب آهن و زغال سنگ آنتراسیت برای باری که ۳۰٪ پیش احیاء شده است.

نسبت احتراق ثانویه

احیای 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 احیایی این گاز نسبتاً بالاست و در نتیجه احیای سنگ آهن تا درصدهای بالا توسط گاز امکان‌پذیر است. راه دیگر برای بازیابی انرژیهای حرارتی و شیمیایی گاز کنترل فشار جزئی اکسیژن داخل راکتور به منظور احتراق درصدی از CO و H₂ موجود در گاز و تأمین قسمتی از انرژی حرارتی مورد نیاز راکتور است (شکل ۲). 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 درصد در شکل ۲ شده است.

باید توجه داشت که استفاده از انرژی حاصل از احتراق ثانویه منوط به انتقال سریع حرارت از گاز به حوضچه فلز و سرباره است. آزمایشهای انجام شده در مقیاس نیمه‌صنعتی 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 اضافه شدن نسبت احتراق ثانویه دمای گاز فزونی می‌یابد (شکل ۳). اضافه شدن دمای گاز توأم با کاهش بازدهی انتقال حرارت در اثر افزایش نسبت احتراق ثانویه می‌تواند اختلالاتی را در کار راکتورهای ذوب و تصفیه مستقیم به وجود آورد. برای مثال دمای طراحی شده کوره‌های احیای مستقیم که معمولاً بین ۸۰۰ 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 احیایی کم در کوره‌های احیای مستقیم می‌تواند لزوم افزایش دبی و تغییر ترکیب شیمیایی را خاطر نشان سازد.

بازدهی انتقال حرارت

بازدهی انتقال حرارت از فاز گاز به فازهای مذاب درون کوره به شدت تلاطم مذاب، نوع و مشخصات زغال سنگ بار شده و تعداد، مکان و طرح دمنده‌های اکسیژن بستگی دارد. برای افزایش میزان تلاطم، می‌توان اکسیژن دمیده شده را با گاز CO₂ یا N₂ مخلوط کرده و عمل دمش را نیز از کف انجام داد. تحقیقات 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 احیای مستقیم می‌کاهد.

تأثیر نسبت احتراق ثانویه بر بازدهی انتقال حرارت را می‌توان با کمک موازنه حرارتی در کوره‌های واقعی ذوب و تصفیه مستقیم به دست آورد. این تأثیر برای کوره ۵ تنی نیمه‌صنعتی مورد اشاره در مرجع ۹ به صورت رابطه ۳ قابل تعیین است:

$$\eta_{pc} = 100 - 90 \left(\frac{PCR}{100} \right)^{0.8} \frac{1}{p} \quad (3)$$

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

رابطه ۳ به وضوح نشان می‌دهد که برای دستیابی به یک بازدهی حرارتی معین، لازم است دو کمیت PCR و p را به نحوی کنترل کرد که با افزایش نسبت احتراق ثانویه از بازدهی حرارتی کاسته نشود (شکل ۴). 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 ارتفاع دمنده‌های اکسیژن از سطح سرباره حائز اهمیت بسیاری می‌باشد که لازم است به آن توجه شود.

انتخاب سوخت

نوع سوخت بار شده بر بازدهی انتقال حرارت و میزان مصرف سوخت تأثیر دارد. یک نمونه از این نوع تأثیر در شکل ۵ نمایش داده شده است. اگر چه دستیابی به بازدهی حرارتی صددرصد در شرایط عملی غیرممکن به نظر می‌رسد، لکن با تغییر نوع سوخت و شرایط احتراق ثانویه ممکن است بتوان صرفه‌جویی قابل‌توجهی در میزان مصرف سوخت به وجود آورد. برای مثال اطلاعات شکل ۵ 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.

شرایط بهینه اقتصادی

به منظور 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 هم مقایسه کرد. برای مثال ارزیابی تأثیر نوع سوخت بر هزینه فرایند منجر به نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۷ می‌شود. محاسبات برای دو راکتور ۵ تنی تحت شرایط زیر انجام شده است:

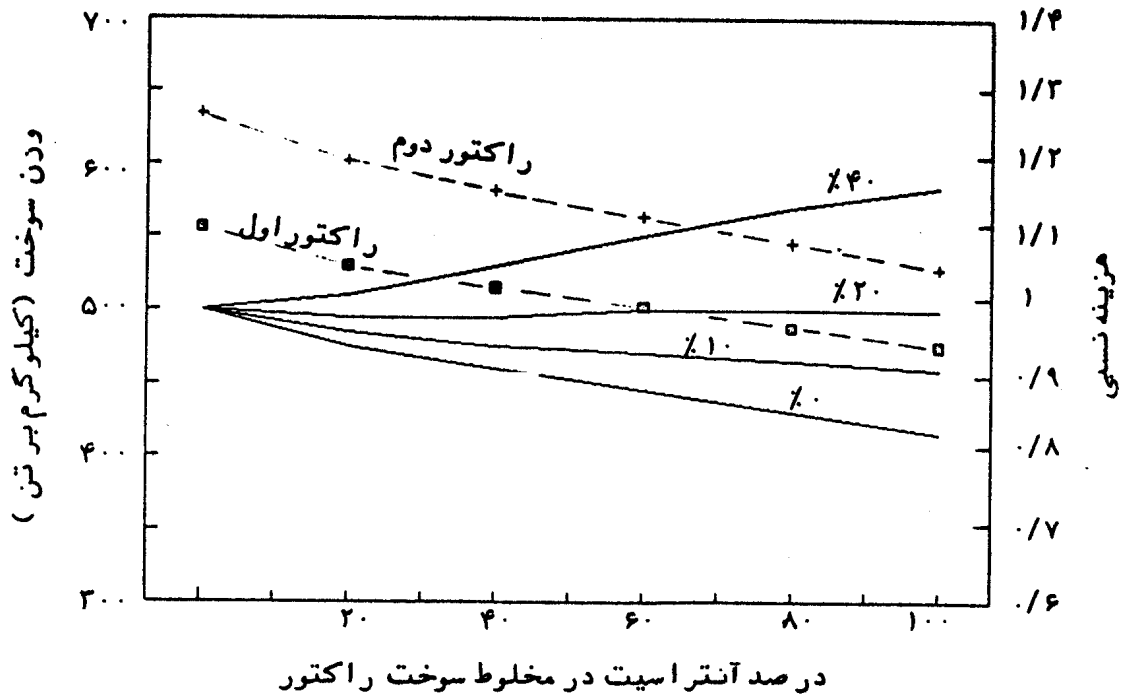
راکتور اول

درجه احیای اولیه: ۳۰ درصد، نسبت احتراق ثانویه: ۵۰ درصد.

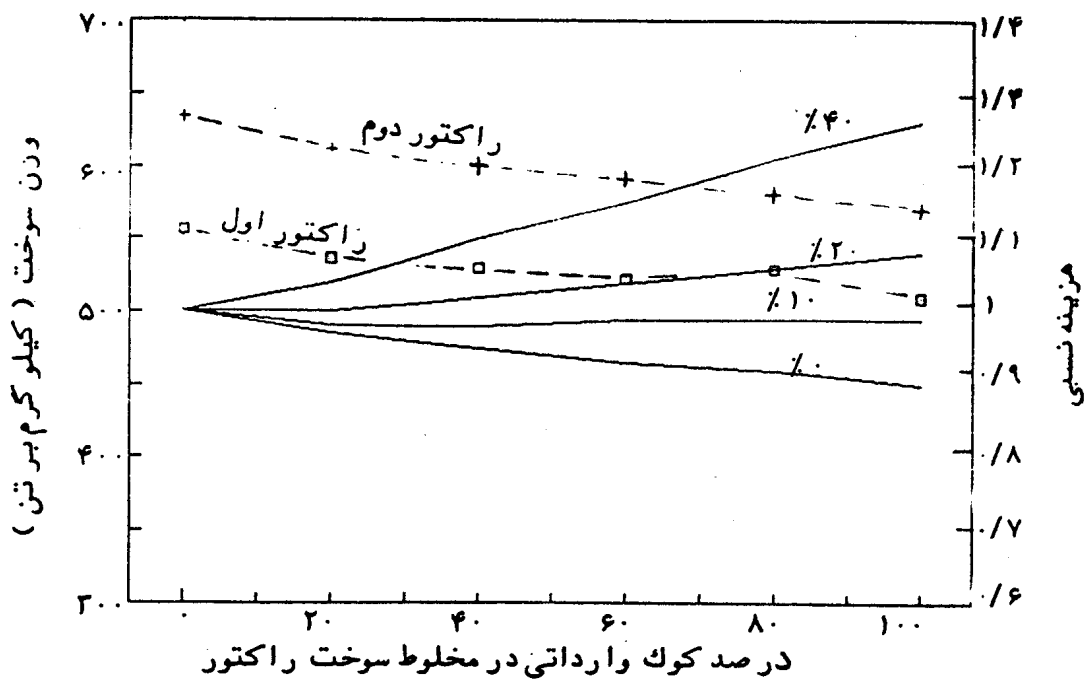
راکتور دوم

درجه احیای اولیه: ۶۰ درصد، نسبت احتراق ثانویه: ۳۰ درصد.

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 ذوب آهن اصفهان باشد، استفاده از کوک ذوب آهن اصفهان اقتصادی‌تر خواهد بود. منحنی‌های شکل‌های ۶ و ۷ مصرف سوخت راکتور اول را ۷۰ تا ۸۰ کیلوگرم بر تن فلز مذاب کمتر از مصرف سوخت در راکتور دوم نشان می‌دهد.



شکل ۶ 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.



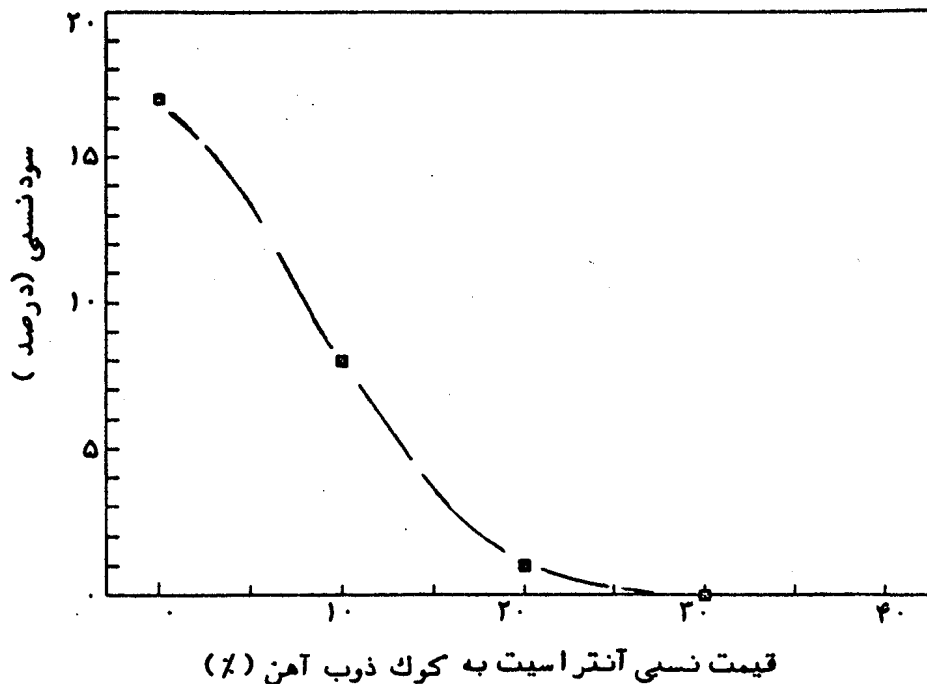
شکل ۷ اثر درصد کوک و آرداتی در مخلوط با کوک ذوب آهن بر مصرف سوخت و هزینه نسبی فرایند. خطوط درصد هزینه ثابت برای راکتور دوم ترسیم شده است.

اثر مخلوط کردن سوختها بر سود نسبی فرایند در شکل ۸ 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 دیگر از این نوع اطلاعات در شکل ۹ نشان داده شده است که در آن مازاد سود نسبی برای راکتور با تولید ۵۰۰۰۰۰ تن فلز در سال بر حسب قیمت کوک ذوب آهن اصفهان رسم شده است. اطلاعات شکل میزان فایده حاصل از مخلوط کردن را در صورت افزایش قیمت های داخلی آشکار می سازد.

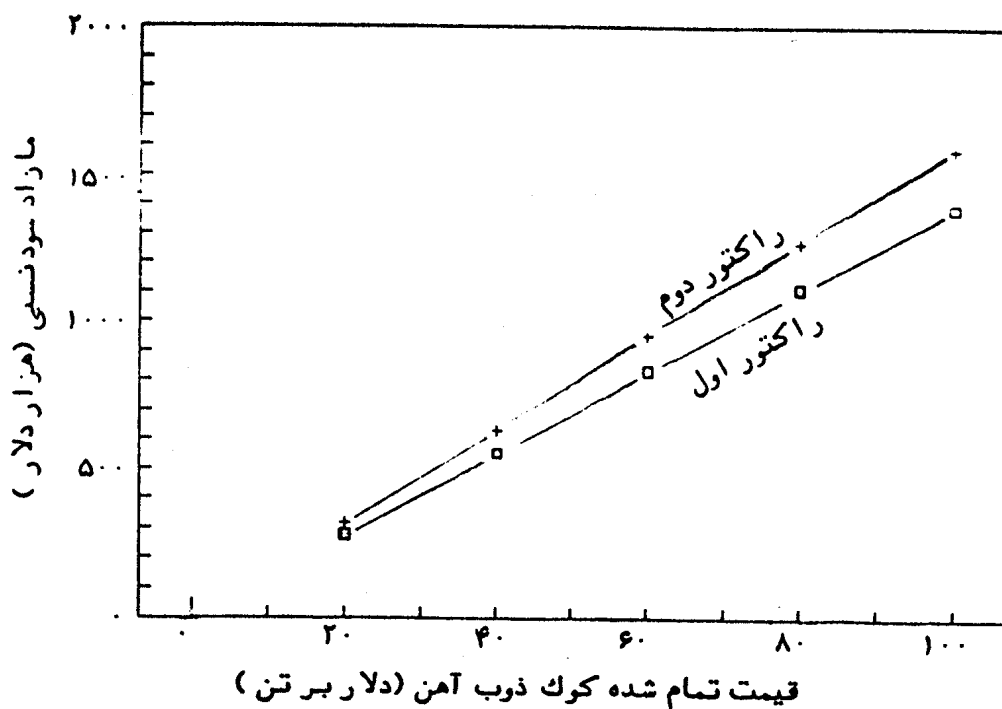
نتیجه گیری و جمع بندی

شبیه سازی فرایند ذوب و تصفیه مستقیم می تواند 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 به دست دهد. به ویژه آنکه با توجه به پیچیدگی های فراوان فرایند، امکان آزمایش های عملی قبل از رسیدن به جواب های قابل قبول از طریق محاسبات الگو، کاری دشوار و پرهزینه است.

الگوی ریاضی ساخته شده در این تحقیق می تواند کمک شایانی برای دستیابی به اطلاعات مورد نیاز در مورد فرایند ذوب و تصفیه مستقیم از طریق پیش بینی عملکرد راکتور تحت شرایط اجرایی گوناگون به دست دهد. نتایج محاسبات می تواند در عملیات طراحی و به کارگیری راکتور به کار رود.



شکل ۸ اثر قیمت نسبی آنتراسیت به کوک ذوب آهن اصفهان بر سود حاصل از افزایش آنتراسیت در مخلوط سوخت.



شکل ۹ مآزاد سود نسبی که در اثر مخلوط کردن کوك ذوب آهن با آتراسیت به نسبت ۶۰ به ۴۰ برای طراحی یک راکتور با ظرفیت ۵۰۰۰۰۰ تن در سال به دست می‌آید. قیمت دو نوع سوخت یکسان فرض شده است.

مراجع

- [۱] ناصر توحیدی، «جزوه احیای 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 احیای 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 melting Reduction of Iron Ore-An Approach to Commercial Ironmaking": I& SM, (December 1990), 306.
- [6] Y. Kishimoto, K. Yamaguchi, S. Takeuchi, Y. Sakuraya and T. Fujii, "Smelting Reduction of Iron- 37."
- [7] H. Katayama, T. Ohno, M. "Ore in 5 ton Test Converter": Transaction ISIJ, Vol. 28, (1988).

- [8] Yamauchi, M. Matsuo, T. Kawamura and T. Ibaraki, "Mechanism of Iron Oxide Reduction and Heat Transfer in the Smelting Reduction Process with a Tick Layer of Slag": **ISIJ International**.
- [9] T. Hirata, M. Ishikawa and S. Anzaki, "Stirring Effect in Bath-Smelting Furnace with Combined 32, 1, (1992), 65-101. Blowing of Top and Side Blown Oxygen and Bottom blown Nitrogen": **ISIJ International**, Vol 32, 2, (1992), 182-189.
- [10] K. Takahashi, M. Muroya, K. Kondo, T. Hasegawa, I. Kikuchi and M. Kawa Kami, "Post 32,2, (1992), 182-189. Combustion Behaviour in In-bath Type Smelting Reduction Furnace": **ISIJ International**, Vol 32,1,(1992), 102-110.