

شبیه سازی فرآیندهای ذوب و تصفیه مستقیم فولاد

عبدالرضا سیم چی و خطیب الاسلام صدرنژاد
دانشکده مهندسی متالورژی - دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

جایگزین کردن پودر زغال سنگ بجای کوک متالورژی در فرآیند ذوب و تصفیه مستقیم فولاد امروزه در سطح جهان مورد توجه قرار گرفته و پیشرفتهایی نیز بدست آمده است. اما، بدلیل اثرات متقابل عوامل مؤثر بر بازدهی فرآیند همچون، نوع و ابعاد کوره، سرعت احیاء اکسیدهای آهن در سرباره، شدت تلاطم مذاب، درجه احیاء اولیه و نسبت احتراق ثانویه، بررسی دقیق و طراحی راکتورهای آن تنها از طریق استفاده از مدل‌های کامپیوتری امکان پذیر است. در این تحقیق به منظور تعیین نحوه و میزان تاثیر این عوامل بر مصرف انرژی و سرعت تولید محصول یک الگوی ریاضی - فیزیکی مبتنی بر اصول ترمودینامیکی و سینتیکی حاکم بر سیستم و با استفاده از قوانین انتقال حرارت و انتقال جرم و سینتیک تحولات همگن و غیر همگن درون و بیرون فازها شبیه سازی شده است. نتایج محاسبات الگو نشان می‌دهد که محدودیتهای اصلی این فرآیند سرعت احیاء اکسید آهن در سرباره، سرعت انتقال حرارت از فاز گاز به فازهای درون کوره و کف آلود شدن سرباره است. بر اساس نتایج بدست آمده، پیش احیاء سنگ آهن تا FeO ، افزایش تعداد و سطح پوشش دمنده های اکسیژن و دمش ازت از کف کوره برای دستیابی به سرعت تولید بالا و کاهش مصرف انرژی ضروری بنظر می رسد. از طرفی کنترل محتوای FeO سرباره در حد ۸-۵ درصد و ایجاد قشر ضخیمی از سرباره بالای حوضچه فلزی می تواند در کاهش ارتفاع سرباره کف آلود و تقلیل گوگرد موجود در فلز مؤثر باشد.

مقدمه

در سالهای اخیر فرآیندهای ذوب و تصفیه مستقیم به لحاظ سرعت تولید بالا، بازدهی حرارتی زیاد، انعطاف پذیری فرآیند و قابلیت استفاده از زغال سنگ های نامرغوب و کاهش سرمایه گذاری اولیه در مقایسه با روش سنتی تولید فولاد، بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. علیهذا بدلیل اثرات متقابل عوامل مختلف، طرح راکتور و کنترل فرآیند به منظور دستیابی به حداکثر بازدهی و سرعت تولید بسیار مشکل است. بدین جهت در چند سال اخیر مطالعات تجربی و نیمه صنعتی متعددی برای بهینه سازی متغیرهای فرآیند انجام شده است [۱]. به علاوه استفاده از الگوهای ریاضی - فیزیکی و برنامه های کامپیوتری کمک شایان توجهی در درک بهتر و عمیق تر فرآیند نموده است [۲-۴]. صدرنژاد و سیم چی [۵] مدل ترمودینامیکی با استفاده از موازنه جرمی - حرارتی حاکم بر سیستم تدوین و توسعه داده اند که توسط آن اثرات متقابل متغیرهای فرآیند براحتی قابل بررسی بوده و می تواند برای طراحی راکتورهای ذوب و تصفیه بکار گرفته شود. در ادامه تحقیقات قبلی، با استفاده از مدل‌های ترمودینامیکی موجود برای محلولهای فلزی و یونی، برنامه به نحوی توسعه یافته است که امکان بررسی نحوه تصفیه فلز مذاب و حالت تعادل بین فازهای درون راکتور (فلز، سرباره و گاز) وجود دارد. همچنین با استفاده از

سمپوزیوم فولاد ۷۵

۳ الی ۵ مهرماه ۱۳۷۵

دانشکده مهندسی مواد - دانشگاه صنعتی اصفهان

معادلات سینتیکی واکنش های همگن و غیر همگن درون و بیرون فازها، سرعت تولید و ارتفاع سرباره کف آلود نیز قابل پیش بینی است. در این مقاله نتایج بدست آمده از مدل سازی جامع فرآیند بر اساس مدل ترمودینامیکی - سینتیکی ارائه می شود.

مدل سازی

الف - مدل ترمودینامیکی: شکل (۱) نمونه ای از فرآیند ذوب و تصفیه مستقیم فولاد مورد بررسی در این تحقیق را نشان می دهد. این فرآیند از دو واحد اصل یکی راکتور ذوب و تصفیه مبتنی بر روش فولاد سازی اکسیژنی و دیگری واحد احیاء مستقیم با گاز تشکیل شده است. بدلیل فراوانی عوامل مؤثر بر سرعت تولید در ابتدا فرآیند بر اساس اصول ترمودینامیکی حاکم بر سیستم مدل سازی شد. شکل (۲) نمودار گردش این برنامه را نشان می دهد.

به منظور بررسی نحوه تصفیه فلز مذاب و حالت تعادل بین فازهای درون راکتور لازم است اکتیویته اجزاء سازنده سرباره، فلز و گاز تعیین شوند. اکتیویته اجزاء سازنده سرباره توسط مدل محلول با قاعده [۶] قابل پیش بینی است. در این مدل انرژی آزاد اضافی جزئی اجزاء محلول توسط معادله زیر تعیین می شوند:

$$\bar{G}_i^E = RT \ln \gamma_i = \sum \alpha_{ij} X_j^2 + \sum \sum (\alpha_{ij} + \alpha_{ik} - \alpha_{jk}) X_j X_k \quad X_i \neq X_j \neq X_k \quad (1)$$

نظر به اینکه رفتار فرآیند اجزاء سازنده سرباره های فولاد سازی را نمی توان با قاعده فرض نمود، انحراف از مدل محلول با قاعده توسط پارامتر "انرژی آزاد تبدیل" به صورت ذیل تصحیح شد:

$$RT \ln a_i = RT \ln a_{i(R,S)} + \Delta G^\circ \quad (2)$$

اگر چه نتایج بدست آمده از آزمایشهای تجربی [۷ و ۸] بخوبی نشان داده اند که این مدل برای پیش بینی اکتیویته اجزاء سازنده سرباره های فولاد سازی قابل استفاده است علیهذا بزرگترین عیب این مدل عدم توانایی آن در پیش بینی رفتار سولفور در سرباره می باشد [۸]. به منظور محاسبه محتوای سولفور سرباره از بازسیته اپتیکی بر طبق معادله زیر استفاده شده است [۹]:

$$\text{Log} (\%S) = \frac{1}{2} \text{Log} \left(\frac{P_{SO_2}}{P_{O_2}} \right) - 13.913 + 42.84\Delta - 23.82\Delta^2 - \left(\frac{11710}{T} \right) - 0.0222\% \text{SiO}_2 - 0.02275\% \text{Al}_2\text{O}_3 \quad (3)$$

به طوریکه داریم [۱۰]:

$$\Delta = \sum N_i \Delta_i \quad (4)$$

$$N_i = \frac{n_i X_i}{\sum n_i X_i} \quad (5)$$

فشار جزئی اکسیژن و سولفور با در نظر گرفتن حالت تعادل بین فاز گاز و فلز بدست می آید. اکتیویته اجزاء سازنده فلز را نیز می توان با استفاده از ضرایب تاثیر مرتبه اول و دوم تعیین نمود [۱۱]:

$$\text{Log} f_i = \sum e_i^l (\%j) + \sum r_i^l (\%j)^2 \quad (6)$$

با در نظر گرفتن حالت تعادل بین آهن مذاب و FeO سرباره، محتوای اکسیژن فلز بر طبق معادله زیر محاسبه شد [۱۲]:

$$[\%O] = 0.6867\Delta + 0.00296 \% \text{FeO} + 0.5106 \quad (7)$$

مقادیر انرژی آزاد تاثیر بین کاتیونهای سرباره (α)، انرژی آزاد تبدیل محلول با قاعده به محلول حقیقی (ΔG°)، بازسیته اپتیکی اکسیدهای خالص (Δ_i) و ضرایب تاثیر مرتبه اول (e_i^l) و دوم (r_i^l) در مرجع (۱) ذکر شده است.

فشار جزئی گازهای درون کوره با استفاده از نسبت احتراق ثانویه (معادله ۸) و ثوابت تعادل بین گازها بر

ب - کف آلود شدن سرباره

حجم گازی که در این فرآیند تولید می شود نسبتاً زیاد است. این گاز در موقع خارج شدن از سرباره آنرا بشدت کف آلود می کند تا حدی که ممکن است از دهانه راکتور سرریز کند. از طرفی کف آلود شدن سرباره بر بازدهی انتقال حرارت از فاز گاز به حوضچه مذاب نیز مؤثر است.

نتایج محاسبات الگو نشان داد که محتوی FeO سرباره مهمترین عامل مؤثر بر ارتفاع سرباره کف آلود و سرعت تولید است. شکل (۷) نمونه ای از این اثر را برای دو راکتور ۵ و ۱۰۰ تنی موضوع مورد تحقیق نشان می دهد. اگر چه افزایش محتوای FeO سرباره و بسکوزیته آنرا کاهش می دهد (شکل ۸)، علیهذا بدلیل افزایش سرعت ظاهری گاز، ارتفاع سرباره کف آلود فزودنی می یابد. اگر فضای آزاد بالای حوضچه فلز برای این دو راکتور به ترتیب ۳ و ۶ متر باشد، سرعت تولید به ۱ و ۴۰ تن بر ساعت محدود می شود. این نتایج با تحقیقات انجام شده در راکتورهای نیمه صنعتی [۱۴] مطابقت دارد. شایان ذکر است که نوع سوخت و شرایط عملکرد راکتور نیز بر ارتفاع سرباره کف آلود تأثیر دارند. نمونه ای از این تأثیر برای دو راکتور با شرایط عملکرد مختلف؛ یکی درجه احیاء اولیه بالا و دیگری نسبت احتراق ثانویه زیاد، در شکل (۹) نشان داده شده است. ارقام بدست آمده از محاسبات بخوبی نشان می دهد که افزایش نسبت احتراق ثانویه تا ۵۰ درصد و پیش احیاء سنگ آهن تا ۳۰ درصد علاوه بر کاهش مصرف سوخت، ارتفاع سرباره کف آلود را نیز کاهش داده و افزایش سرعت تولید را موجب می شود.

ج - محتوای گوگرد فلز

یکی از مهمترین محدودیت های این فرآیند، بالا بودن محتوای گوگرد فلز بدلیل استفاده مستقیم از زغال سنگ به جای کوک متالورژی است. کاهش FeO سرباره به تقلیل گوگرد موجود در فلز کمک می کند. شکل (۱۰) این موضوع را بخوبی نشان می دهد. افزایش محتوای گوگرد فلز و ارتفاع سرباره کف آلود در اثر افزایش FeO سرباره می تواند اختلالاتی را در کار راکتورهای ذوب و تصفیه ایجاد کند. با توجه به اینکه سرباره این فرآیندها بسیار خورنده است لذا، کنترل FeO موجود در سرباره بسیار حائز اهمیت می باشد که لازم است به آن توجه شود. با کنترل فشار جزیی اکسیژن و ایجاد قشر ضخیمی از سرباره بالای حوضچه فلز تا حدودی می توان این مشکل را مرتفع نمود.

جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله نحوه مدل سازی فرآیند ذوب و تصفیه مستقیم با استفاده از الگوهای انتقال حرارت، انتقال جرم، ترمودینامیک و سینتیک ارائه شد. مدل حاضر را می توان برای طراحی راکتور قبل از تقبل هزینه و وقت فراوان برای مطالعات تجربی بکار برد. نتایج بدست آمده از این تحقیق در موارد ذیل خلاصه می شوند:

۱ - افزایش نسبت احتراق ثانویه تا ۵۰ درصد و پیش احیای سنگ آهن تا ۳۰ درصد علاوه بر کاهش مصرف سوخت سرعت تولید را تا ۲۵ درصد فزونی می دهد. از طرفی ارتفاع سرباره کف آلود نیز کاهش می یابد. ولی به هر جهت، در نسبت های بیش از ۳۰ درصد میزان FeO سرباره بالا خواهد بود و فلز از کربن اشباع نمی شود.

۲ - افزایش سرعت بارگیری، محتوای FeO سرباره را فزونی داده و لذا سرعت تولید افزایش می یابد. همچنین بارگیری پیوسته مواد به جای بارگیری منقطع، افزایش بازدهی حرارتی و سرعت تولید را موجب می شود. در اینجا باید توجه داشت که اگر سرعت بارگیری از حدی بیشتر شود بدلیل افزایش سطح تماس بین ذرات

غوطه ور در سرباره و کاهش ضریب انتقال حرارت موضعی در اطراف آنها، زمان ذوب افزایش یافته و بازدهی حرارتی و سرعت تولید مجدداً تنزل می‌کند.

۳- برای دستیابی به یک بازدهی حرارتی بالا لازم است تعداد و سطح پوشش دمنده های اکسیژن در فاز سرباره بیشتر شود. افزایش شدت تلاطم مذاب توسط دمش اکسیژن همراه با CO_2 یا N_2 از کف علاوه بر بهبود بازدهی حرارتی راکتور، سرعت تولید را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد.

۴- افزایش محتوای FeO سرباره ویسکوزیته آنرا کاهش می‌دهد اما بدلیل افزایش سرعت ظاهری گاز ارتفاع سرباره کف آلود ممکن است فزونی یابد. با توجه به اینکه سرباره این فرآیندها بسیار خورنده می‌باشد بهتر است FeO آنرا در حد ۵-۸ درصد نگه داشت. کاهش FeO سرباره به تقلیل گوگرد موجود در فلز نیز کمک می‌کند.

۵- با توجه به اینکه سرباره محل انجام واکنشهای تولید و تصفیه است و نقش محافظ را در مقابل اکسید شدن مجدد فلز ایفا می‌کند، لذا لازم است عمق سرباره در بالای حوضچه فلز بحد کافی زیاد باشد.

علائم و اختصارات

A: مساحت (m^2)	O: ماتریس مشخصه آنالیز مواد خروجی (-)
a: پارامتر چسبندگی (-)	P: کمیت بدون بعد (-)
a_i : اکتیویته جزء i در محلول (-)	P: سرعت تولید (kg/min)
b: پارامتر چسبندگی (-)	P_c : نسبت احتراق ثانویه (%)
c: ضریب تاثیر مرتبه اول (-)	P_i : فشار جزئی i (atm)
f: کسر وزنی آهن در فاز جامد (-)	Q: دبی گاز (m^3/s)
\dot{F} : سرعت بارگیری (kg / min)	R: ثابت جهانی گازها (J/mole.K)
f_i : ضریب اکتیویته جزء i در محلول فلزی (-)	\dot{R} : سرعت احیاء (K mole - O_2 /min)
G^E : انرژی آزاد مولار اضافی جزئی (j)	r: ضریب تاثیر مرتبه دوم (-)
ΔG° : انرژی آزاد تبدیل (J)	r_0 : شعاع (cm)
H: ارتفاع سرباره کف آلود (m)	T: دما (K)
h: ضریب انتقال حرارت ($J/cm^2.s.K$)	t: زمان (min)
ΔH_m : گرمای نهان ذوب (J)	V: حجم مولی ($cm^3/mole$)
I: ماتریس مشخصه آنالیز شیمیایی بار ورودی (-)	W: وزن (Kg)
k: ثابت سرعت احیاء اکسید آهن در سرباره	X: ماتریس مجهول های سیستم (-)
($K mole-O_2 / (min.(T.\%Fe) . m^2$)	X_i : مول جزئی کاتیون i در سرباره (-)
k_1 : ثابت سرعت واکنش در فصل مشترک فلز-سرباره	α : انرژی تاثیر بین کاتیونها (J)
($K mole-O_2 / (min.(T.\%Fe).m^2$)	β : ضریب اکتیویته (-)
k_2 : ثابت سرعت واکنش در فصل مشترک قطرات ریز فلز	η_{pe} : بازدهی انتقال حرارت (%)
در سرباره ($K mole - O_2 / (min.(T.\%Fe).T.Slag$)	μ : ویسکوزیته سطحی ($N.s/m^2$)
k_3 : ثابت سرعت واکنش در قطعات کربن دار غوطه ور	ρ : چگالی (gr / cm^2)
در سرباره ($K mole - O_2 / min.(T.\%Fe).T.Car$)	σ : کشش سطحی (N/m)
N_i : کسر معادل کاتیون i در سرباره (-)	Δ : بازسیته ایتیکی (-)
n_i : تعداد مولهای جزء i در ترکیب (mole)	

زیروندها

C: کربن m: ذوب R.S: محلول با قاعده S: سرباره

اساس واکنش گاز - آب (معادله ۹) تعیین می شود:

$$P_c = 100 \left(\frac{P_{CO_2} + P_{H_2O}}{P_{CO_2} + P_{CO} + P_{H_2O} + P_{H_2}} \right) \quad (۸)$$



احتراق ثانویه گاز، شرط تعادل دمایی گاز در حوضچه فلزی را مختل می کند. بازدهی انتقال حرارت حاصل از احتراق ثانویه به فازهای مذاب (η_{Pc}) با استفاده از معادله زیر قابل محاسبه است [۱۳]:

$$\eta_{Pc} = 100 - 90 \left(\frac{PC}{100} \right)^{0.9} \cdot \frac{1}{P} \quad (۱۰)$$

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

ب - مدل سینتیکی: نتایج بدست آمده از کار با راکتورهای نیمه صنعتی [۱۴] نشان داده است که سرعت تولید در فرآیند فولاد سازی مستقیم به سرعت ذوب و احیا اکسید آهن در سرباره بستگی دارد و به طور مستقیم با محتوای آهن سرباره متناسب است:

$$\dot{R} = k \cdot \%Fe \quad (۱۱)$$

با موازنه جرمی در فاز سرباره داریم:

$$\frac{dw_{Fe}}{dt} = f(\dot{i}) - \frac{n_{Fe}}{n_o} \cdot M_{Fe} \cdot k \cdot \%Fe \quad (۱۲)$$

ثابت سرعت (k) در معادلات اخیر به شدت تلاطم و دمای حوضچه مذاب، حجم سرباره و وزن کربن غوطه ور در آن بستگی دارد و توسط معادله زیر قابل تعیین است [۱۵]:

$$k = k_1 + \left[\frac{W_s}{A} \right] \left[k_2 + \frac{W_c}{W_s} k_3 \right] / 1000 \quad (۱۳)$$

با حل همزمان معادلات (۱۱) تا (۱۳) سرعت تولید را می توان پیش بینی نمود.

ج - کف آلود شدن سرباره

ارتفاع سرباره کف آلود به مشخصات فیزیکی سرباره و سرعت ظاهری گاز در آن بستگی دارد [۱۶ و ۱۷]:

$$H = 156 \frac{\mu_s}{\sqrt{\rho \sigma}} \cdot \frac{Q}{A} \quad (۱۴)$$

برای محاسبه کشش سطحی و چگالی سرباره می توان نوشت [۱۸ و ۱۰]:

$$\sigma = \sum X_i \bar{\sigma}_i \quad (۱۵)$$

$$V = \sum X_i \bar{V}_i \quad (۱۶)$$

که در آن $\bar{\sigma}$ و \bar{V}_i به ترتیب کشش سطحی و حجم مولی جزء i در حالت خالص است. نحوه تغییر کشش سطحی و حجم مولی با دما بطور خطی و به ترتیب با نسبت $\left(\frac{N}{m.K} \right)$ و $\left(\frac{1}{K} \right)$ و 0.15 و 0.01 در نظر گرفته می شود [۱۹]. ویسکوزیته سرباره را نیز می توان برحسب آنالیز شیمیایی آن و دما، توسط معادله زیر پیش بینی نمود [۲۰]:

$$\mu = a T \exp \left(\frac{1000 b}{T} \right) \quad (۱۷)$$

خواننده می تواند برای آشنایی با نحوه محاسبه a و b بر حسب آنالیز شیمیایی سرباره به مأخذ ۱ مراجعه نماید.

نتایج و بحث

برنامه کامپیوتری ساخته شده در این تحقیق می تواند برای طرح راکتور و کنترل فرآیند ذوب و تصفیه استفاده

شود. نتایج بدست آمده از مطالعات گذشته [۵] نشان داد که اگر چه عوامل بسیار متعددی بر طرح راکتور اثر دارند اما، درجه احیاء اولیه، نسبت احتراق ثانویه و بازدهی انتقال حرارت از فاز گاز فازهای درون راکتور مهمترین عوامل کنترل کننده مصرف انرژی و بازدهی حرارتی هستند. این نتایج نشان داد که نسبت احتراق ثانویه تا ۵۰ درصد توسط کنترل فشار جزئی اکسیژن در راکتور، افزایش تعداد دمنده های اکسیژن و دمش ازت از کف راکتور، مصرف سوخت را تا مقدار قابل توجهی کاهش می دهد. ولی سنگ آهن را نمی توان تا بیش از ۳۰ درصد احیاء نمود.

در اینجا باید توجه داشت که در طراحی و ساخت راکتورهای ذوب و تصفیه تنها نباید به مصرف سوخت بسنده کرد بلکه کاهش سرعت انجام تحولات فیزیکی شیمیایی قطعات غوطه ور در فازهای مذاب درون کوره و کف آلود شدن سرباره تنزل میزان و سرعت تولید را موجب می شود. تحت این شرایط لازم است نحوه اثر این عوامل و عوامل دیگری همچون سرعت بارگیری، آنالیز مواد، ابعاد کوره و اندازه قطعات بر سرعت تولید مطالعه شود. برای این منظور، مدلسازی دو راکتور ۵ و ۱۰۰ تنی با مشخصات داده شده در جدول (۱) انجام شده و نتایج بدست آمده در موارد ذیل خلاصه و شرح داده می شوند:

الف - سرعت بارگیری

به منظور بررسی نحوه اثر افزایش سرعت بارگیری بر سرعت تولید و بازدهی حرارتی کوره، فرآیند توسط ذوب گلوله های سربی در کوره تامن شبیه سازی شده است. شکل (۳) ابعاد راکتور مورد استفاده و شکل (۴) نحوه انجام آزمایش را نشان می دهد. نتایج بدست آمده از مطالعات تجربی نشان داد که افزایش سرعت بارگیری، بدلیل افزایش ضریب انتقال حرارت موضعی بین گلوله ها، سرعت تولید را فزونی می دهد. اما، اگر سرعت بارگیری از حدی فراتر رود بدلیل افزایش سطح تماس بین گلوله ها، زمان ذوب کاهش یافته و سرعت تولید تنزل می کند [۱].

نحوه اثر سرعت بارگیری بر محتوای آهن سرباره برای راکتور ۵ تنی موضوع تحقیق در شکل (۵) نشان داده شده است. این شکل بوضوح نشان می دهد که با افزایش سرعت بارگیری محتوای آهن سرباره افزایش یافته و لذا سرعت تولید فزونی می یابد (شکل ۶). شایان ذکر است، این محاسبات مربوط به شرایطی است که سنگ آهن پیش احیاء نشده باشد. اگر سنگ آهن تا ۳۰ درصد احیاء شود، سرعت تولید را می توان با استفاده از معادله زیر پیش بینی نمود:

$$\frac{\dot{P}_{FeO}}{\dot{P}_{Fe_2O_3}} = \left[\frac{h_{FeO}}{h_{Fe_2O_3}} \right]^3 \left[\frac{t_{m,Fe_2O_3} \cdot \rho_{FeO}}{t_{m,FeO} \cdot \rho_{Fe_2O_3}} \right] \quad (18)$$

برای محاسبه زمان ذوب قطعات غوطه ور در سرباره از معادله زیر استفاده شد:

$$t_m = \frac{0.06 \rho \Delta H_m r_o}{wh (T_s - T_m)} \quad (19)$$

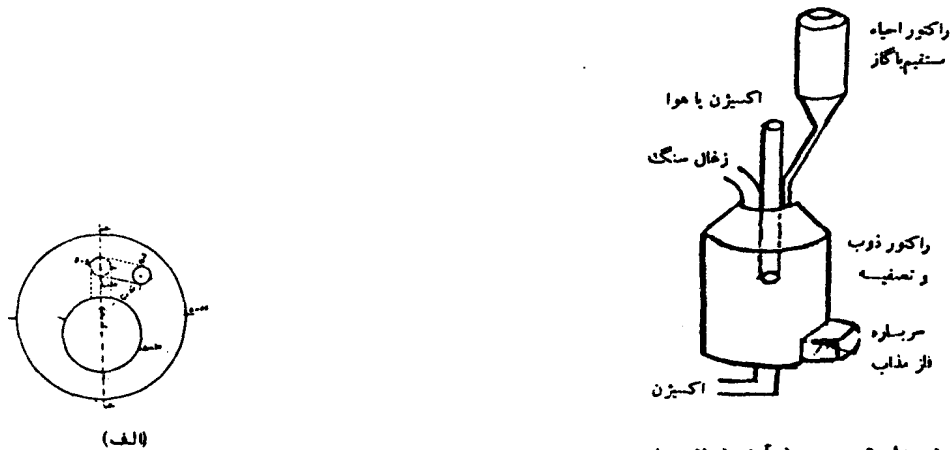
نتایج محاسبات الگو نشان داد که بدلیل کاهش زمان ذوب گندله های وستیتی، سرعت تولید تا ۲۵ درصد افزایش می یابد. این نتایج با مطالعات تجربی انجام شده در مقیاس نیمه صنعتی توسط سایر محققین [۲۱] مطابقت دارد. بنابراین کاهش مصرف سوخت توأم با افزایش سرعت تولید در اثر افزایش درجه احیاء اولیه، لزوم پیش احیاء سنگ آهن را خاطر نشان می سازد. از طرفی افزایش شدت تلاطم مذاب توسط دمش اکسیژن همراه با CO₂ یا N₂ از کف، علاوه بر بالا نگه داشتن بازدهی انتقال حرارت از فاز گاز به فازهای مذاب درون راکتور [۵] می تواند زمان ذوب گندله ها را نیز افزایش دهد و لذا سرعت تولید فزونی می یابد که لازم است به آن توجه شود.

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف به خاطر حمایت مالی از تحقیق سپاسگزاری می شود.

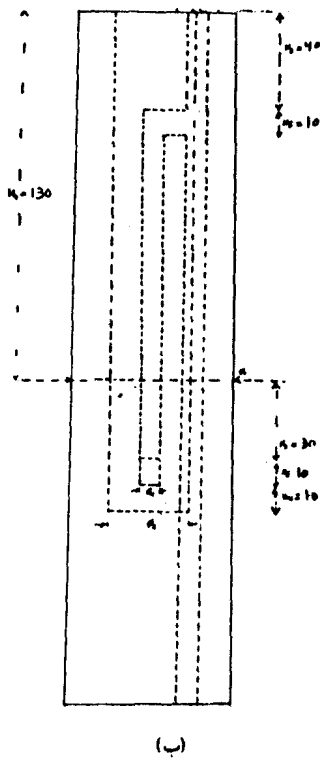
مراجع

- ۱ - عبدالرضا سیم جی، "تولید مواد آهنی با استفاده از آهن اسفنجی - ذوب و تصفیه مستقیم فولاد": رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، بهمن ۱۳۷۳.
2. R. J. Fruehan, K. Ito and B. Oztork, "Analysis of Bath Smelting Processes for Production Iron": *I&SM*, (November 1988). 83-91.
3. H. Li and M. Tokuda, "Investigation on the Effect of Zn on the Behaviour of S in the Bath Smelting Reduction Process": *Steel Research*, 64, (1993), 39-44.
4. M. Shin, J. Yoon and M. Tokuda, "Simulation Analysis of Coal Packed Bed Type Smelting Reduction Process": *ISIJ Int.*, 33, (1993), 385-390.
- ۵ - خطیب الاسلام صدرزاد و عبدالرضا سیم جی، "شبه سازی ذوب و تصفیه مستقیم فولاد: نشریه دانشکده فنی، (زیر چاپ).
6. S. Ban-Ya, "Mathematical Expression of Slag-Metal Reaction in Steelmaking Process by Quadratic Formalism Based on the Regular Solution Modell": *ISIJ Int.*, 33, (1993), 102-110.
7. R. Nagabayashi, M. Hino and S. Ban-Ya, "Mathematical Expression of Phosphorus Distribution in Steelmaking Process by Quadratic formalism". *Proc. of 3rd Int. Conf on Molten Slags and Fluxes*, Glasgow, (1988), 24-27.
8. J. Guochang, X. Kuangdi and W. Shoukun, "Some Advances on the Theoretical Research of Slag": *ISIJ Int.*, 33, (1993), 20-25.
9. B. Ozturk, R. Roth and R. J. Fruehan, "Formation of H₂S in the Bath Smelting Process": *ISIJ Int.*, 34, (1994), 663-669.
10. K. C. Mills, "The Influence of Structure on Physico - Chemical Properties of Slags": *ISIJ Int.*, 33, (1993), 148-155.
11. M. Nagamori, "Discussion of Thermodynamic Consistency of the Interction Parameter Formalism": *Metall. Trans.*, 20B, (1989), 434-437.
12. A. Bergman and A. Gustafsson, "Use of Optical Basicity to Calulate Phosphorus and Oxygen Contents in Moltea Iron": *Proc. of 3rd Int. Symp. on Molten Slags and Fluxes*, Glasgow, (1988), 150-153.
13. K. Takahashi, M. Muroya, K. Kondo, T. Hasegawa, I. K. Kuchi and M. Kawakami, "Post Combustion Behavior In-Bath Type Smelting - Reduction Furnace": *ISIJ Int.*, 32, (1992), 102-110.
14. T. Ibaraki, M. Kanemote, S. Cgats, H. Katayama, and H. Ishikawa, "Development on Smelting Reduction of Iron Ore An Approach to Commercial Ironmaking": *I&SM*, (December, 1990), 30-37.
15. 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 Thich Layer of Slag": *ISIJ Int.*, 32, (1992), 95-101.
16. R. Jiang and R. J. Fruehan, "Slag Foaming in Bath Smelting": *Metall. Trans.*, 22B, (1991), 481-489.
17. R. E. Roth, R. Jiang and R. J. Fruehan, "Foaming of Ladle and BOS-Mn Smelting Slags": *I&SM*, (November 1992), 55-63.

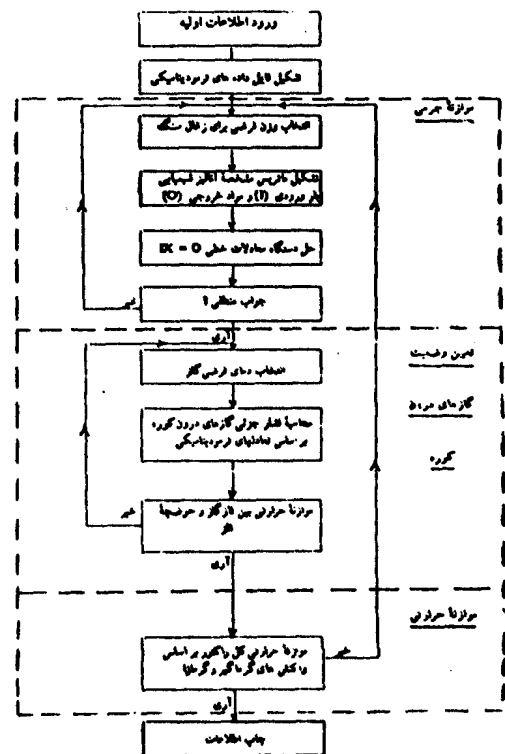
18. K. Nakashima and K. Mori, "Interfacial Properties of Liquid Iron-Alloys and Liquid Slags Relating to Iron-and Steel-Making Processes": *ISIJ Int.*, 32,(1992), 11-18.
19. K. C. Mills and B. J. Keene :*Int. Mater. Rev.*, 32, (1987), 1-115.
20. G. Urbain, "Viscosity Estimation of Slags", *Steel Research*, 58, (1987), 111-116.
21. B. Ozturk and R. J. Fruehen, "Dissolution of Fe₂O₃ and FeO Pellets in Bath Smelting Slags": *ISIJ Int.*, 32, (1992), 538-544.



شکل ۱۰- نمودار تصویری فرآیند فولاد سازی مستقیم که برای مدل سازی مورد استفاده قرار گرفته است.



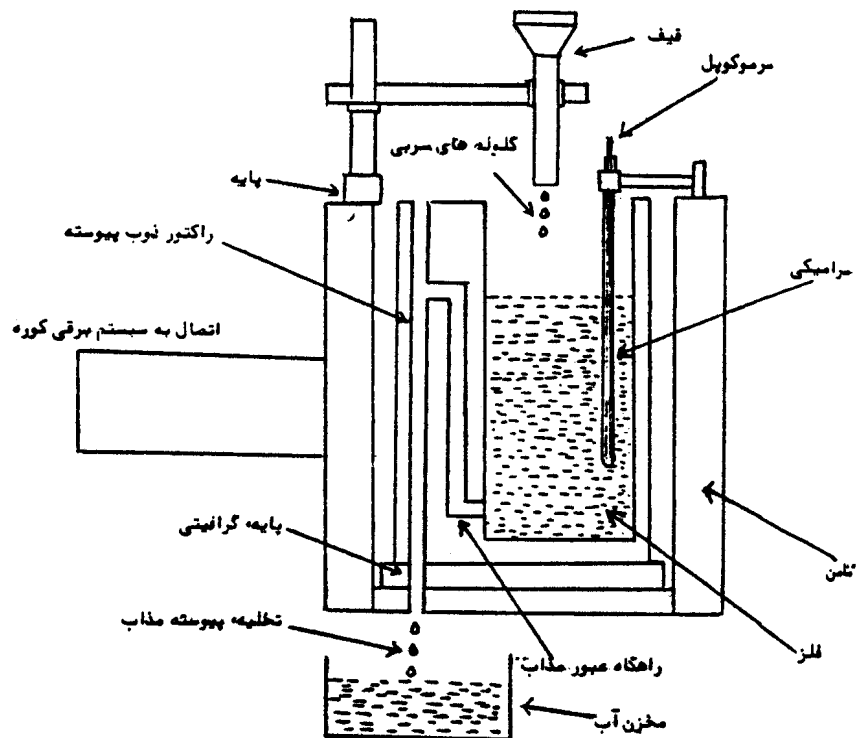
شکل ۳- نقشه فنی راکتور ذوب پیوسته طراحی شده برای موضوع تحقیق. الف-تصویر از بالا ب-تصویر از دور و مقیاس ترسیم ۲:۱ است. واحدها بر حسب میلیمتر بیان شده اند.



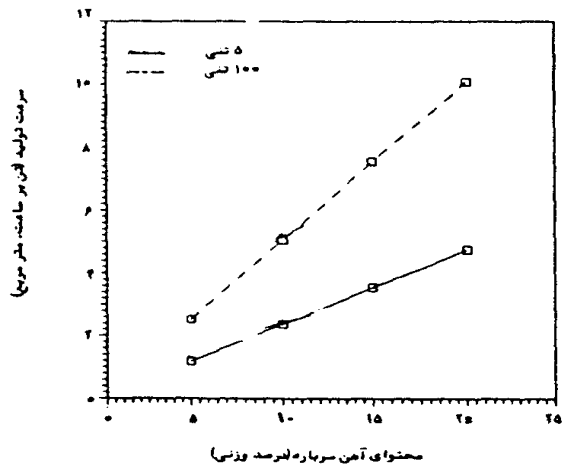
شکل ۱۱- نمودار گرمایی برنامه مدل سازی راکتور ذوب و تعریفه بر اساس مدل ترمو پانیکی

جدول ۱- اطلاعات اولیه استفاده شده در الگوسازی راکتورهای ۵ و ۱۰۰ تنی موضوع تحقیق.

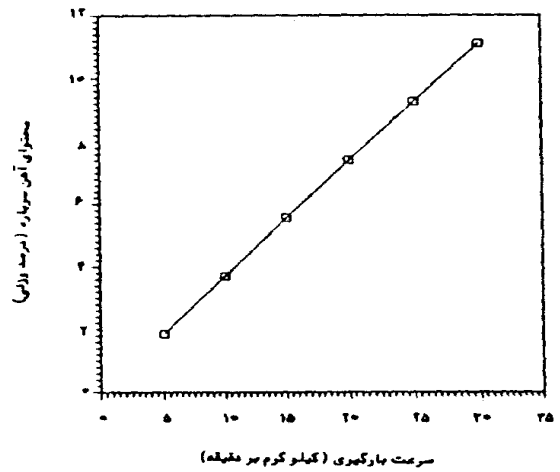
واحد	راکتور		پارامتر
	۱۰۰ تنی	۵ تنی	
m^3	۳۰	۱	سطح حوضچه فلز
t	۶۰	۰/۵	وزن سرپاره
t	۳۰	۰/۲	وزن مواد کربنی غوطه ور در سرپاره
$Kmole-O_2/(min.(T.\%Fe)m^3)$	۰/۰۲۲		ثابت سرعت برای واکنش در فصل مشترک فلز-سرپاره
$Kmole-O_2/(min.(T.\%Fe).T.slag)$	۰/۰۱۴		ثابت سرعت برای واکنش در فصل مشترک قطرات فلز در سرپاره
$Kmole-O_2/(min.(T.\%Fe).T.Car.)$	۰/۰۴		ثابت سرعت برای واکنش در فصل مشترک مواد کربنی-سرپاره



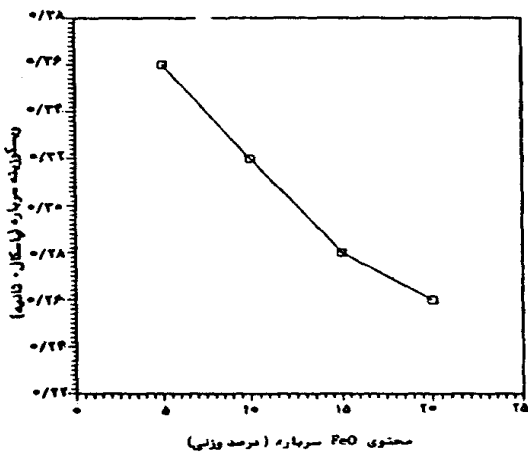
شکل ۳- پارگی پیوسته گلوله های سری به راکتور نوب پیوسته موضوع تحقیق.



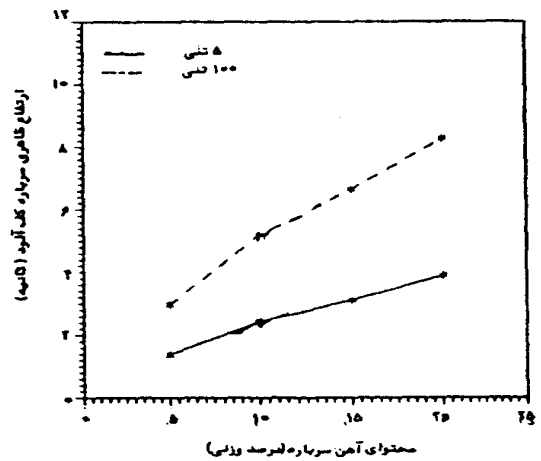
شکل ۴ - تاثیر محتوای آهن سرباره بر سرعت تولید



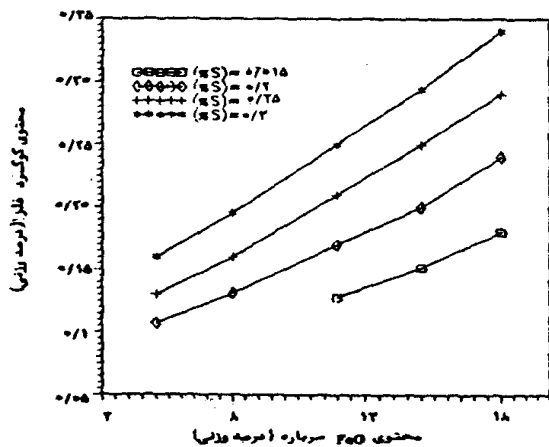
شکل ۵ - تاثیر سرعت بارگیری بر محتوای آهن سرباره



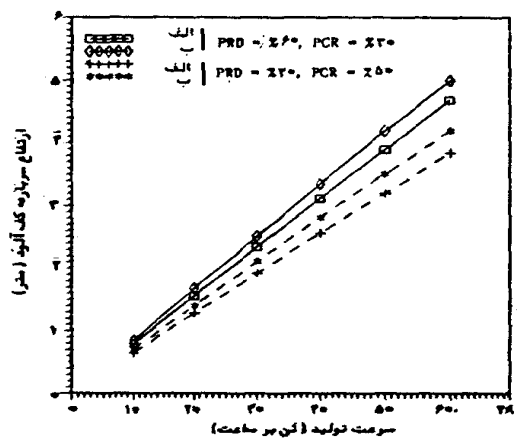
شکل ۶ - تاثیر محتوای FeO سرباره بر ویسکوزیته آن (1-CaO/SiO2 و 2-CO) (1777-T)



شکل ۷ - تاثیر محتوای آهن سرباره بر ارتفاع قاعده سرباره کف آلود



شکل ۸ - تاثیر محتوای سرباره بر محتوای گوگرد فلز



شکل ۹ - تاثیر درصد FeO سرباره بر ارتفاع سرباره کف آلود در دیتورهای اول و دوم موضوع تحقیق