



گروه ملی صنعتی فولاد ایران



انجمن آهن و فولاد ایران



دانشگاه شهید چمران اهواز

سمپوزیوم فولاد ۸۷

۱۳ و ۱۴ اسفند ماه ۸۷

اهواز - دانشگاه شهید چمران

بررسی اثر مقدار سیلیسیم اولیه مذاب بر فرایند فسفرزدایی از آهن خام قبل از ورود به کنورتور

حامد عبدیزدان^۱ - حسین ادريس^۲ - محمد حسن عباسی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد- دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مواد- دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استاد دانشکده مهندسی مواد- دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

این پژوهش با هدف مطالعه اثر مقدار سیلیسیم اولیه آهن خام بر فرایند فسفرزدایی مذاب قبل از ورود به کنورتور انجام شد. بدین منظور آزمایشهای مورد نظر با استفاده از آهن خام تولیدی واحد کوره بلند شرکت ذوب آهن اصفهان در یک کوره القایی به ظرفیت ۲۰ کیلوگرم دارای نسوز منیزیتی و در محدوده دمایی ۱۳۵۰-۱۴۵۰ درجه سانتیگراد صورت گرفت. آزمایش‌های حذف فسفر با استفاده از فلاکس قلبایی بر مبنای آهک با استفاده از آهن خام حاوی مقادیر ۰/۳۵، ۰/۲، و ۰/۰۵ درصد سیلیسیم انجام شد. نتایج آزمایشها نشان داد ابتدا بایستی مقدار سیلیسیم اولیه مذاب به کمتر از ۰/۱۵ کاهش یابد تا در ادامه حذف فسفر امکانپذیر گردد. این موضوع با استفاده از مقادیر انرژی آزاد گیبس در واکنش اکسیداسیون این دو عنصر بررسی شده و در ادامه با استفاده از روابط تجربی و در نظر گرفتن نتایج مطالعات گذشته مشخص شد پتانسیل اکسیژن مذاب برای آغاز واکنش حذف فسفر معادل پتانسیل اکسیژنی است که با ۰/۱۵ درصد سیلیسیم در آهن خام مذاب در تعادل است.

کلمات کلیدی: فسفرزدایی، آهن خام، سیلیسیم اولیه.

¹- h.abdeyazdan@ma.iut.ac.ir

²- h-edris@cc.iut.ac.ir

³-abbasi32@cc.iut.ac.ir

مقدمه

آماده‌سازی آهن خام قبل از ورود مذاب به کنورتور Hot Metal Pretreatment یکی از ضروریات فرایندهای فولادسازی مدرن است. در انجام این فرایند ابتدا مقادیر ناخالصی‌هایی نظیر فسفر و گوگرد تا حد معینی کاهش می‌یابد و در ادامه مذاب وارد مرحله فولادسازی می‌شود. از جمله مزایای این عملیات می‌توان به امکان استفاده از مواد اولیه با مقادیر فسفر و گوگرد بالاتر، کاهش زمان مرحله فولادسازی و بهبود کیفیت محصول نهایی اشاره کرد [۱]. اما یکی از مهمترین مسائل در کاهش میزان فسفر آهن خام، مقدار سیلیسیم اولیه مذاب است در مطالعات گذشته توسط سایر محققین مشخص شده است نقش سیلیسیم اولیه مذاب در نتایج فرایند حذف فسفر مهم و حائز اهمیت است بطوریکه ابتدا بایستی مقدار سیلیسیم آهن خام تا حد معینی کاهش یابد تا در ادامه حذف فسفر امکانپذیر گردد [۲]. در اغلب بررسی‌های انجام شده مقدار سیلیسیم اولیه مذاب برای شروع واکنش حذف فسفر حدود ۰/۱۵ درصد بیان شده است. لذا در این پژوهش با استفاده از فلاکس قلیایی بر مبنای آهک آزمایشهای حذف فسفر بر روی آهن خام با مقادیر مختلف سیلیسیم انجام شد و با استفاده از اصول تئوری و روابط تجربی مورد تحلیل قرار گرفت.

روش تحقیق

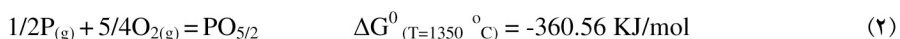
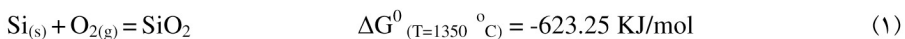
به منظور بررسی اثر مقدار سیلیسیم اولیه آهن خام بر نتایج فرایند فسفرزدایی، آهن خام تولید واحد کوره بلند شرکت ذوب آهن اصفهان با ترکیب شیمیایی معین تهیه شد. آزمایشهای حذف فسفر در کوره القایی به ظرفیت ۲۰ کیلوگرم دارای نسوز منیزیتی و در محدوده دمایی 1450°C - 1350°C انجام شد. وزن فلاکس مصرفی معادل ۱۰٪ وزن چدن در نظر گرفته شد. جهت تهیه فلاکس، مواد تشکیل دهنده آن شامل آهک، فلورین، پوسته‌های اکسیدی آهن و کربنات سدیم پس از دانه‌بندی در ابعاد ۳-۲ میلی متر، به نسبت‌های مورد نظر مخلوط شدند و بمنظور حذف رطوبت به مدت ۲ ساعت در دمای 100°C خشک و آماده‌سازی شد. در هر مرحله از تحقیق پس از تهیه مذاب آهن خام درون کوره، ابتدا نمونه‌برداری اولیه از ذوب و سرباره انجام شد سپس یک مرحله سرباره‌گیری صورت گرفت، در ادامه فلاکس به دو قسمت مساوی تقسیم شده و هر بخش طی مدت زمان ۱۰ دقیقه روی سطح ذوب ریخته شد و در پایان هر بخش نمونه‌برداری از چدن و سرباره و عملیات سرباره‌گیری انجام شد. بدین صورت نمونه‌های آهن خام و سرباره از ابتدا، میانه و انتهای فرایند تهیه و به ترتیب به نام‌های A، B، C معرفی و آنالیز شدند.

نتایج و بحث

نتایج آنالیز نمونه های آهن خام و سرباره در مراحل سه گانه این پژوهش که با استفاده از آهن خام حاوی ۰/۳، ۰/۱۵ و ۰/۰۵ درصد سیلیسیم انجام شد، در جداول ۱ و ۲ مشاهده می شود. بررسی نتایج مرحله اول نشان می دهد در نیمه ابتدایی آزمایش حذف سیلیسیم صورت گرفته در حالیکه فسفرزدایی اتفاق نیفتاده است و در ده دقیقه پایانی آزمون حذف فسفر به مقدار ناچیزی حدود ۴ درصد انجام شده است.

در مرحله دوم تحقیق که از مذابی حاوی ۰/۱۵ درصد سیلیسیم استفاده شده است حذف سیلیسیم و فسفر از ابتدای آزمایش آغاز شده و حذف فسفر در نیمه دوم آزمون شدت یافته است. حذف فسفر در این مرحله برابر ۳۵ درصد انجام شده است. بررسی نتایج مرحله سوم نشان می دهد کاهش میزان فسفر از ابتدای آزمون با شدت آغاز شده و تا پایان فرایند ادامه یافته و بیشترین میزان حذف فسفر معادل ۴۲ درصد حاصل شده است. نتایج حاصل نشان می دهد مقدار سیلیسیم اولیه مذاب نقش مهمی در نتایج فرایند حذف فسفر دارد بطوریکه ابتدا بایستی کاهش مقدار سیلیسیم مذاب انجام گیرد تا در ادامه فسفرزدایی امکانپذیر گردد. در بررسی این موضوع از واکنشهای حذف این دو عنصر که بر پایه اکسیداسیون استوار است استفاده می گردد.

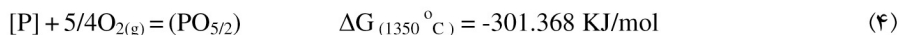
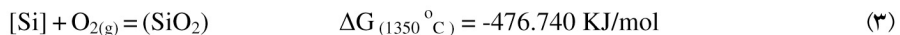
همانطور که می دانیم از دیدگاه ترمودینامیکی تغییرات انرژی آزاد گیبس معیاری است برای بررسی امکان انجام یک واکنش شیمیایی به صورت خودبه خودی؛ به طوری که چنانچه ΔG یک واکنش شیمیایی کوچکتر از صفر باشد واکنش مورد نظر به صورت خودبه خود انجام می شود. برای واکنشهای رقابتی می توان گفت در شرایط ترمودینامیکی معین واکنشی که ΔG کوچکتری دارد در ابتدا آغاز می شود. به عنوان مثال در مورد اکسیداسیون دو عنصر آنکه ΔG کوچکتری دارد تمایل بیش تری به واکنش با اکسیژن دارد و ابتدا اکسیداسیون آن آغاز شده و تا حد معینی پیش می رود و در ادامه واکنش عنصر دیگر امکان پذیر می گردد. در مورد واکنش اکسیداسیون سیلیسیم و فسفر شرایط بدین صورت است. در بررسی این موضوع واکنشهای اکسیداسیون این عناصر با استفاده از تغییرات انرژی آزاد گیبس بررسی و پایداری اکسیدهای سیلیسیم و فسفر نسبت به یکدیگر مقایسه می شود [۲].



یک مدل برهم کنش پارامتری^۱ [۲] به منظور برآورد مقادیر اکتیویته در حالت استاندارد راولتی برای مذابی با ترکیب شیمیایی مشابه آهن خام مورد استفاده در این تحقیق به کار رفته که نتایج آن بدین

¹ Interaction Parameter Model

صورت به صورت $a_{Si}=0.00001663$, $a_P=0.0000124$ به دست آمده است. با فرض اینکه اکسیدهای سیلیسیم و فسفر خالص بوده و فشار جزئی اکسیژن معادل یک اتمسفر باشد واکنش های اکسیداسیون به صورت زیر بیان می گردد:



مشاهده می شود در این شرایط اکسید سیلیسیم نسبت به اکسید فسفر پایدارتر است و لذا به منظور ایجاد شرایط لازم برای حذف فسفر از آهن خام لازم است ابتدا اکسیداسیون سیلیسیم تا مقدار معینی انجام شود تا در ادامه حذف هر دو عنصر انجام شود [۲]. شکل های ۱ و ۲ به ترتیب مقادیر اکسیژن تعادلی برای حذف سیلیسیم و فسفر در محدوده دمایی ۱۶۵۰-۱۵۵۰ درجه سانتی گراد را نشان می دهند. با فرض اینکه برای محدوده دمایی ۱۴۵۰-۱۳۵۰ درجه سانتی گراد نیز نموداری شبیه دماهای ذکر شده رسم گردد می توان پیش بینی کرد حداقل اکسیژن حل شده مورد نیاز برای اکسیداسیون سیلیسیم کمتر از ۰/۰۰۵ درصد است در حالی که جهت اکسیداسیون فسفر و حذف آن در شرایط مشابه مقدار اکسیژن تعادلی بیش از ۰/۱ درصد است و لذا اکسیداسیون سیلیسیم بر فسفر مقدم است. لازم به ذکر است مقادیر اکسیژن تعادلی ذکر شده تنها به منظور مقایسه پتانسیل اکسیدی مورد نیاز جهت حذف فسفر و سیلیسیم بیان شده است در حالی که در شرایط واقعی با استفاده از آهک اکتیویته اکسیدهای سیلیسیم و فسفر در سرباره کاهش یافته و میزان اکسیژن مورد نیاز جهت اکسیداسیون هر دو عنصر کاهش می یابد. بررسی های محققین نیز نشان می دهد چنانچه شرایط ترمودینامیکی لازم برای حذف فسفر که شامل سرباره بازی، محدوده دمایی و پتانسیل اکسیژن مورد نیاز است، فراهم گردد یکی از مهم ترین عوامل مؤثر بر این فرایند میزان سیلیسیم اولیه مذاب است زیرا بر اساس آنچه بیان شد اکسیداسیون سیلیسیم بر فسفر مقدم بوده و تنها هنگامی حذف فسفر امکان پذیر است که مقدار سیلیسیم مذاب به حدود ۰/۱۵ درصد کاهش یابد [۵-۲]. اما در این قسمت مبحث میزان اکسیژن تعادلی جهت حذف فسفر تحت سرباره مورد استفاده مطرح شده و با میزان اکسیژن حل شده در مذاب مقایسه می شود. در ادامه تلاش می شود مقدار سیلیسیم مذاب برای آغاز واکنش فسفرزدایی محاسبه و با یافته های سایر محققین مقایسه گردد. در تحقیقات مشابه بیان شده است ابتدا بایستی میزان سیلیسیم اولیه آهن خام به حدود ۰/۱۵ درصد کاهش یابد تا در ادامه حذف هر دو عنصر امکان پذیر گردد [۵-۲]. به منظور انجام بررسی های فوق ابتدا با استفاده از تعادل واکنش کربن و گاز مونو اکسید کربن مقدار اکسیژن حل شده در مذاب محاسبه می - شود و سپس با توجه به نتایج آنالیز نمونه های سرباره در مراحل مختلف و با استفاده از روابط تجربی که توسط محققین بیان شده است میزان اکسیژن تعادلی برای حذف فسفر تحت سرباره های موجود در هر

قسمت (میانه و انتها) از مراحل سه گانه این پژوهش محاسبه و با یکدیگر مقایسه می شود. در ادامه با توجه به نتایج آنالیز سیلیسیم مذاب در مراحل مختلف و مقادیر اکسیژن تعادلی جهت حذف فسفر، مقدار سیلیسیم تعادلی جهت آغاز حذف فسفر محاسبه و با نتایج سایر محققین مقایسه می شود. لازم به یادآوری در محاسبات زیر دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی گراد به عنوان میانگین دمای انجام آزمایش ها به کار رفته و وزن سرباره برابر مقدار فلاکس یعنی ۱ کیلوگرم در هر بخش از مراحل سه گانه در نظر گرفته شده است. - اندازه گیری پتانسیل اکسیژن مذاب با استفاده از تعادل کربن. یکی از راه های اندازه گیری اکسیژن حل شده در مذاب آهن خام استفاده از تعادل کربن و مونو اکسید کربن است. بر این اساس می توان نوشت:

$$[C] + [O] = CO_{(g)} \quad , \quad \Delta G = \Delta G^0 + RT \ln K \quad (5)$$

در حالت تعادل $\Delta G^0 = -RT \ln K$ خواهد بود. انرژی آزاد گیبس در حالت استاندارد برای واکنش فوق به صورت $\Delta G^0 = -22400 - 39.69T$ (J) زیر بیان شده است [۳]. با جایگذاری دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی گراد در رابطه فوق $\Delta G^0 = -88801.37$ J محاسبه می شود. اگر مقدار ΔG^0 در رابطه ۵ جایگزین شود خواهیم داشت:

$$-88801.37 = -RT \ln \{ (P_{CO}) / (a_C \cdot a_O) \} \quad (6)$$

با فرض این که مذاب از کربن اشباع باشد $P_{CO} = 1 \text{ atm}$, $a_C = 1$ خواهد بود. لذا $[\% O] = 1.69 \times 10^{-3}$ به دست می آید. بر اساس محاسبات فوق مقدار اکسیژن حل شده در مذاب محاسبه شد. در ادامه با استفاده از روابط تجربی مقدار اکسیژن تعادلی جهت حذف فسفر در مراحل اول، دوم و سوم با استفاده از آنالیز سرباره هر بخش محاسبه می گردد.

- اندازه گیری پتانسیل اکسیژن تعادلی جهت حذف فسفر تحت سرباره با ترکیب شیمیایی معین. به منظور محاسبه اکسیژن تعادلی جهت اکسیداسیون فسفر واکنش زیر را در نظر می گیریم:



ثابت تعادل این واکنش بدین صورت بیان می گردد:

$$K_{PO} = \{ (a_{P_2O_5}) / (a_P^2 \cdot a_O^5) \} \quad (8)$$

با توجه به پایین بودن مقادیر فسفر و اکسیژن در مذاب، با فرض اینکه ضریب اکتیویته برابر یک باشد، غلظت های جرمی را جایگزین اکتیویته می کنیم:

$$K_{PO} = \{ (\gamma_{P_2O_5} \cdot X_{P_2O_5}) / ([\% P]^2 \cdot [\% O]^5) \} \quad (9)$$

روابط تجربی زیر برای محاسبه K_{PO} و $\gamma_{P_2O_5}$ تحت سرباره ای بر مبنای آهک بیان شده است [۶]:

$$\text{Log } K_{\text{PO}} = 7.93 \text{ Log } (\% \text{CaO} + 0.3\% \text{MgO} - 0.05\% \text{FeO}) + (21660/T) - 26.929 \quad (10)$$

$$\text{Log } \gamma_{\text{P}_2\text{O}_5} = -0.985 (23X_{\text{CaO}} + 17X_{\text{MgO}} + 8X_{\text{FeO}}) - (22270/T) + 8.818 \quad (11)$$

که در روابط فوق X نشان دهنده کسر مولی است و با استفاده از تعداد مول اجزاء سرباره (n_i) قابل محاسبه است: لذا با داشتن مقادیر K_{PO} ، $X_{\text{P}_2\text{O}_5}$ ، $\gamma_{\text{P}_2\text{O}_5}$ و $[\% \text{P}]$ میزان $[\% \text{O}]$ قابل محاسبه است. نتایج محاسبه مقادیر کسر مولی برای اجزاء سرباره و همچنین نتایج مربوط به محاسبه میزان اکسیژن تعادلی جهت حذف فسفر تحت سرباره با آنالیز شیمیایی معین به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است. مشاهده می شود مقادیر اکسیژن تعادلی جهت حذف فسفر کم تر از مقدار اکسیژن حل شده در مذاب است لذا نتیجه گیری می شود مقدار اکسیژن حل شده مورد نیاز جهت حذف فسفر در مذاب فراهم شده است. اما در بخش های مختلف مراحل سه گانه تحقیق مشاهده می شود تنها در نیمه ابتدایی مرحله اول تحقیق حذف فسفر صورت نگرفته است در حالی که مقدار اکسیژن مورد نیاز جهت حذف وجود دارد این موضوع مربوط است به مقدار سیلیسیم مذاب. در حقیقت تا انتهای ده دقیقه ابتدایی حذف سیلیسیم صورت گرفته و مقدار آن تا حدود ۰/۱۳۵ درصد کاهش یافته است. این مقدار مشابه میزانی است که در تحقیقات سایر محققین به عنوان حد شروع واکنش حذف فسفر بیان شده است لذا انتظار می رود چنانچه اکسیژن تعادلی جهت حذف فسفر در مرحله اول تحت سرباره B_S در واکنش اکسیداسیون سیلیسیم جایگزین شود و اکتیویته سیلیس با توجه به ترکیب شیمیایی سرباره از اطلاعات موجود استخراج گردد، مقدار سیلیسیم تعادلی مشخص گردد که می توان نتایج را با گزارش نتیجه تحقیقات دیگران مقایسه کرد. جهت بررسی این موضوع واکنش اکسیداسیون سیلیسیم را در نظر می گیریم.



در حالت تعادل $\Delta G^0 = -RT \text{ Ln } K$ خواهد بود. از طرفی می دانیم برای واکنش فوق $\Delta G^0 = -594600 + 230.3T$ است [۶]: و در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی گراد مقدار $\Delta G^0 = -209308.1$ (J) محاسبه می شود. که می توان نوشت:

$$\Delta G^0 = -RT \text{ Ln } \{ (a_{\text{SiO}_2}) / (a_{\text{Si}} \cdot a_{\text{O}}^2) \} \quad (13)$$

با توجه به مقادیر سیلیسیم و اکسیژن در مذاب غلظت های جرمی را جایگزین اکتیویته می کنیم:

$$\Delta G^0 = -RT \text{ Ln } \{ (a_{\text{SiO}_2}) / ([\% \text{Si}] \cdot [\% \text{O}]^2) \} \quad (14)$$

از دیاگرام سه تایی $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}$ که در شکل ۳ مشاهده می شود برای به دست آوردن مقدار اکتیویته SiO_2 در مرحله اول و با استفاده از ترکیب سرباره B_S استفاده می کنیم. چنانچه از مجموع

عوامل بازی ($X_{CaO}+X_{MgO}$) یا X_{SiO_2} در دیاگرام فوق استفاده گردد اکتیویته SiO_2 معادل ۰/۱ است که در شکل ۳ مشخص است و لذا با جایگزین کردن مقادیر فوق در رابطه ۱۳ می توان نوشت:

$$-209308.1 = -8.314 \times 1673 \ln \{0.1 / ([\%Si] \times (4.69 \times 10^{-4})^2)\} \quad (15)$$

و مقدار سیلیسیم معادل ۰/۱۴ درصد محاسبه می شود. می توان عکس حالت فوق را نیز در نظر گرفت یعنی اگر میزان سیلیسیم در رابطه اکسیداسیون این عنصر معادل ۰/۱۵ جایگزین شود انتظار می رود مقدار اکسیژن تعادلی معادل مقدار به دست آمده در واکنش حذف فسفر در مرحله اول تحت سرباره B_s یعنی $4/69 \times 10^{-4}$ باشد این مطلب را با جایگزینی اعداد در رابطه K_{Si} بررسی می کنیم:

$$-209308.1 = -8.314 \times 1673 \ln \{(0.1) / [0.15] \times [\%O]^2\} \quad (16)$$

و لذا اکسیژن تعادلی برابر 4.54×10^{-4} محاسبه می شود. مشاهده می شود مقدار سیلیسیم محاسبه شده و مقادیر اکسیژن به دست آمده از تعادل سیلیسیم و فسفر نزدیک به یکدیگر هستند لذا می توان گفت نتایج این پژوهش مؤید این موضوع است که جهت شروع حذف فسفر لازم است مقدار سیلیسیم به کمتر از ۰/۱۵ درصد کاهش یابد.

نتیجه گیری

- ۱- حذف سیلیسیم بر فسفر مقدم است که این موضوع به مقادیر انرژی آزاد گیبس برای واکنش اکسیداسیون این دو عنصر مربوط می شود.
- ۲- در فرایند فسفرزدایی از آهن خام ابتدا بایستی مقدار سیلیسیم اولیه مذاب تا حدود ۰/۱۵ درصد کاهش یابد تا در ادامه حذف فسفر امکانپذیر گردد.
- ۳- مقدار اکسیژن تعادلی برای آغاز واکنش اکسیداسیون فسفر برابر است با مقدار اکسیژنی که با ۰/۱۵ درصد سیلیسیم در تعادل است.

مراجع

- [1] Wakelin, D.H., "The Making Shaping and Treating of Steel", 11th edition, The AISE steel foundation, 1999.
- [2] Hernândes, A., Romeo, A., Chavez, F., Angeles, M. and Morales, R. D., "Dephosphorization and desulfurization pretreatment of molten iron with $CaO-SiO_2-CaF_2-FeO-Na_2O$ slags", ISIJ Int., 1998, Vol. 38, No. 2, pp. 126-131.
- [3] Ohguchi, S., Robertson, D. G. C., Deo, B., Grieveson, P. and Jeffes, J. H. E., "Simultaneous dephosphorization and desulfurization of molten pig iron", Ironmaking Steelmaking., 1984, Vol. 11, No. 4, pp. 202-213.
- [4] Pak, J.J. and Fruehan, R.J., "Dynamics of the hot metal dephosphorization with Na_2O slags", Metall Mater Trans B., 1987, Vol. 18B, pp. 689-693.

[5] Monaghan, B. J., Pomfret, R. J. and Coley, K. S., "The kinetics of dephosphorization of carbon-saturated iron using an oxidizing slag", Metall mater trans B., 1998, Vol. 29B, pp. 111-118.

[۶] محمود امامی گوهری و محمد حسن عباسی "فرایندهای سینتیکی و ترمودینامیکی فسفرزدایی" سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۲.

جدول ۱. نتایج آنالیز نمونه های آهن خام در مراحل مختلف.

| مرحله و نمونه عنصر | مرحله اول | | | مرحله دوم | | | مرحله سوم | | |
|-----------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | A | B | C | A | B | C | A | B | C |
| %Si | ۰/۳۵۰ | ۰/۱۳۵ | ۰/۱۷۰ | ۰/۱۷۰ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۱ |
| %P | ۰/۲۷۳ | ۰/۲۷۳ | ۰/۲۶۱ | ۰/۲۷۱ | ۰/۲۵۸ | ۰/۱۷۶ | ۰/۲۶۸ | ۰/۲۰۸ | ۰/۱۵۹ |

جدول ۲. نتایج آنالیز نمونه های سرباره در مراحل مختلف.

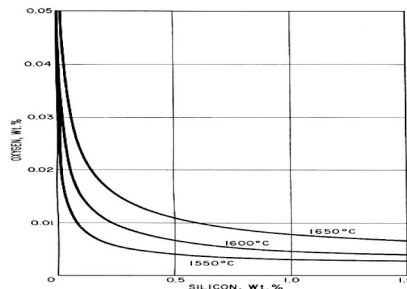
| مرحله و نمونه عنصر یا ترکیب | مرحله اول | | مرحله دوم | | مرحله سوم | |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | B _S | C _S | B _S | C _S | B _S | C _S |
| %P | ۰/۰۱۰ | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۹۰ | ۰/۶۴۴ | ۰/۴۲۷ | ۰/۲۷۰ |
| %S | ۰/۰۵۹ | ۰/۰۵۸ | ۰/۰۷۹ | ۰/۰۷۷ | ۰/۰۷۰ | ۰/۰۷۰ |
| %CaO | ۲۷/۸۲ | ۲۵/۸۱ | ۳۹/۰۷ | ۴۷/۲۶ | ۱۶/۷۲ | ۸/۰۱ |
| %SiO ₂ | ۳۹/۴۳ | ۳۵/۰۶ | ۲۲/۹۰ | ۱۷/۳۲ | ۲۱/۵۳ | ۱۶/۸۲ |

جدول ۳. محاسبه مقادیر کسر مولی برای اجزاء تشکیل دهنده سرباره.

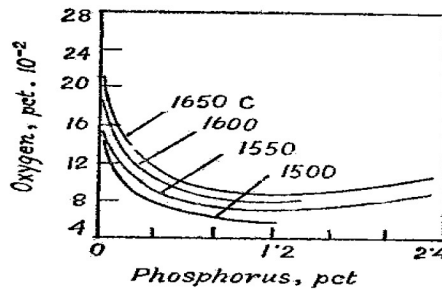
| نمونه سرباره | ترکیب | CaO | MgO | SiO ₂ | MnO | FeO | P ₂ O ₅ |
|--------------|---------------------|---------|----------------|------------------|-------|-------|-------------------------------|
| | | مرحله ۱ | B _S | ۰/۲۸۴ | ۰/۲۶۰ | ۰/۳۷۶ | ۰/۰۳۶ |
| | C _S | ۰/۲۵۳ | ۰/۳۵۷ | ۰/۳۲۱ | ۰/۰۳۹ | ۰/۰۲۸ | ۰/۰۰۲ |
| مرحله ۲ | B _{S-Na} | ۰/۴۷۹ | ۰/۱۴۶ | ۰/۲۶۲ | ۰/۰۴۴ | ۰/۰۶۸ | ۰/۰۰۱ |
| | C _{S-Na} | ۰/۵۳۸ | ۰/۲۰۳ | ۰/۱۸۴ | ۰/۰۲۳ | ۰/۰۴۶ | ۰/۰۰۷ |
| مرحله ۳ | B _{S-Na+O} | ۰/۴۴۰ | ۰/۲۰۵ | ۰/۲۴۵ | ۰/۰۳۴ | ۰/۰۷۰ | ۰/۰۰۵ |
| | C _{S-Na+O} | ۰/۴۳۷ | ۰/۳۳۲ | ۰/۱۷۳ | ۰/۰۱۰ | ۰/۰۴۴ | ۰/۰۰۳ |

جدول ۴. نتایج مربوط به محاسبه اکسیژن تعادلی حذف فسفر در مراحل مختلف.

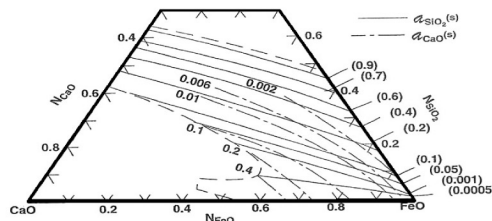
| نمونه سرباره | | کمیت | K_{PO} | $\gamma_{P_2O_5}$ | $X_{P_2O_5}$ | [%P] | [%O] |
|--------------|--------------|------|------------------------|-------------------------|--------------------|-------|------------------------|
| مرحله ۱ | B_S | | $1/143 \times 10^{-2}$ | $3/360 \times 10^{-16}$ | 1×10^{-2} | ۰/۳۰۱ | $4/69 \times 10^{-4}$ |
| | C_S | | $1/265 \times 10^{-2}$ | $3/773 \times 10^{-17}$ | 2×10^{-2} | ۰/۳۰۹ | $5/743 \times 10^{-4}$ |
| مرحله ۲ | B_{S-Na} | | $6/750 \times 10^{-2}$ | $4/728 \times 10^{-19}$ | 1×10^{-2} | ۰/۲۷۱ | $1/57 \times 10^{-4}$ |
| | C_{S-Na} | | $3/520 \times 10^{-1}$ | $3/605 \times 10^{-11}$ | 7×10^{-2} | ۰/۲۶۳ | $6/356 \times 10^{-5}$ |
| مرحله ۳ | B_{S-Na+O} | | $4/560 \times 10^{-2}$ | $3/585 \times 10^{-19}$ | 5×10^{-2} | ۰/۲۶۶ | $2/23 \times 10^{-4}$ |
| | C_{S-Na+O} | | $1/544 \times 10^{-1}$ | $5/02 \times 10^{-11}$ | 3×10^{-2} | ۰/۲۰۸ | $7/42 \times 10^{-5}$ |



شکل ۱. تغییرات اکسیژن تعادلی بر حسب میزان سیلیسیم در دماهای مختلف [۱].



شکل ۲. تغییرات اکسیژن تعادلی بر حسب میزان فسفر در دماهای مختلف [۱].



شکل ۳. تغییرات اکتیویته SiO_2 در سیستم سه تایی $CaO-SiO_2-FeO$ [۱].