سمپوزیوم فولاد ۷۹

۳ و ۴ اسفندماه ۱۳۷۹

اهواز ـ شرکت فولاد خوزستان

شبیه سازی فرایند تولید فولاد در کوره القایی

سید خطیب‌الاسلام صدرنژاد، مهرداد سرکمری

دانشکدهٔ مهندسی و علم مواد ـ دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

اکثر فرایندهای تولید فلز مستلزم تهیه فلز مذاب با شرایط مناسب هستند. هزینه تولید فلز مذاب، معمولاً سهم عمده‌ای از اقتصاد عملیات را در بر می‌گیرد. در فولادسازی، برای مثال، عموماً ۶۰ درصد هزینه مربوط به تهیه مواد اولیه است. برای کاهش این هزینه لازم است تدابیری اندیشیده شود. این تدابیر می‌تواند مربوط به انتخاب نوع، شرایط و نسبتهای وزنی مواد باشد. این کار از دو راه "سعی و خطای عملی" و یا "محاسبه بر مبنای اصول موازنه جرمی، تعادلات ترمودینامیکی و سینتیک فرایند" قابل انجام است. در این مقاله، آمیزه‌ای از هر دو روش همراه با محاسبات مربوط به بهینه سازی مواد اولیه با استفاده از روش برنامه ریزی خطی برای تولید فولاد مذاب در یک کوره الکتریکی القایی ارائه شده است. شبیه سازی بر اساس موازنه‌های جرمی، قوانین تعادل و شیوه حداقل کردن هزینه‌ها انجام شده است. نرم افزار حاصل قادر به پیش بینی مطلوبترین شیوه بارگیری با وجود نوسانات دائمی در شرایط، نوع، ترکیب و هزینه مواد سازنده است.

مقدمه

کوره القایی وسیله مناسبی برای تولید فولاد است؛ زیرا به علت جزئی بودن اتلاف ماده، ترکیب شیمیایی بطور نسبتاً دقیق قابل تنظیم است. برای مثال، اگر از قراضهٔ کم‌کربن و برگشتیهای آلیاژی استفاده شود، کافی است مقادیر محاسبه شده قراضه، برگشتی و فروآلیاژ را در کوره بار کرده و بدون نیاز به تصفیه، از حداکثر توان الکتریکی برای ذوب سریع فولاد بهره جست. تحت این شرایط، ترمودینامیک و سینتیک واکنشها سهم بسیار کوچکی در تحقق فرایند تولید داشته و انجام عملیات در کوتاه‌ترین مدت نتیجه مطلوب را حاصل می‌کند.

از آنجاکه تولید فولاد از طریق ذوب قراضه برگشتی و مواد افزودنی همچون فروآلیاژها در کوره القایی، در بسیاری از کارگاهها انجام می‌شود، لذا محاسبات فنی ـ اقتصادی مشتمل بر مقدار و هزینهٔ مواد و عملیات فولادسازی در این کوره‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است؛ بطوریکه ساخت نرم افزارهایی که بتوانند چنین عملیاتی را تسهیل کنند، بشدت مطلوب و مورد علاقه صنعتکاران و مهندسین تولید می‌باشد؛ بخصوص اگر مبنای تدوین مدل، حداکثر کردن منافع و یا حداقل کردن هزینه‌ها باشد.

بسیاری از واحدهای تولیدی، در انجام عملیات فولادسازی با اتلاف مواد و انرژی و نرسیدن به عیار مطلوب مواجهند. بنابراین ساخت نرم‌افزاری که بتواند محاسبات بار و انرژی را بطور کامل و با ملحوظ کردن کلیه عوامل درگیر تسهیل کند، در شرایط حاضر ضرورت دارد. در طراحی و ساخت این نرم افزار لازم است ضمن انجام موازنه‌های جرمی و حرارتی، با استفاده از شیوه‌های شبیه سازی کامپیوتری نسبت به بهینه کردن عملیات به منظور حداقل کردن هزینه‌ها و حداکثر کردن بازدهی فرایند اقدام شود.

در صورتیکه از مواد متنوعی همچون آهن اسفنجی، و اکسیدهای آهنی استفاده شود، به علت تولید حجم قابل توجه سرباره و ضرورت تصفیه ناخالصیها، تغییرات اساسی در فرایند و در نتیجهٔ محاسبات بوجود خواهد آمد [۱]. افزایش عناصر میکروآلیاژی همچون Cb، Nb، V و Ti می‌تواند باعث تغییر چشمگیر خواص و کاربرد محصولات شود [۲]. انجام واکنشهای تصفیه و انحلال در این‌گونه موارد از پیچیدگیهای ویژه‌ای برخوردار است که تحقیق در مورد آنها را بسیار مطلوب می‌نماید [۳-۶].

حل معادله‌های ترمودینامیکی، انتقال مواد و انتقال حرارت برای تعیین میزان اتلاف و جذب مواد افزوده شده به بار، به منظور دستیابی به مقدار و آنالیز فولاد حاصل در یک برنامه محاسباتی کامپیوتری مشابه نرم‌افزارهای ساخته شده در رابطه با ذوب و تصفیه فلزات [۷-۹] میسر است. چنین برنامه‌ای می‌تواند مراحل اولیه طراحی و آماده‌سازی مواد را تسهیل کرده و ترکیب شیمیایی محصول را پیش‌بینی کند.

انجام عملیات ذوب و آلیاژسازی و سپس تصحیح آنالیز فلز از طریق نمونه‌برداری، تجزیه شیمیایی و جبران کمبود مواد فروآلیاژی تا رسیدن به ترکیب شیمیایی مطلوب از طریق سعی و خطا و مقایسه با نتیجهٔ

محاسبات مربوط به موازنه جرمی، تعادلات ترمودینامیکی و سینتیک فرایند قابل انجام است [۱۰]. بکارگیری نرم‌افزار سبب می‌شود که ترکیب شیمیایی و میزان محصول پیشاپیش محاسبه شود. سپس ذوب کردن، نمونه‌برداری، تجزیهٔ شیمیایی و مقایسه می‌تواند تفاوت بین نتیجه محاسبات و آزمایشها را مشخص کرده و ضرایب تصحیح را بدست دهد.

بسته به ترکیب شیمیایی و خصوصیات فیزیکی، مواد اولیه قیمتهای متفاوتی دارند. برای مثال قیمت فرو آلیاژها عموماً بیشتر است؛ لذا بایستی سعی شود که میزان نیاز به مواد فرو آلیاژی به حداقل خود برسد. برای حداقل کردن جذب گاز، بهتر است از قراضه برگشتی که لااقل یکبار قبلاً گاز زدایی شده استفاده کرد. گاز زدایی و تنظیم درصد عناصر کربن، منگنز، سیلیسیم، گوگرد و فسفر در کوره القایی نیز، در عین حال، امکان‌پذیر است. البته باید توجه داشت که انجام این امور هزینه، زمان و پیچیدگی عملیات را افزایش می‌دهد.

نکات فوق می‌تواند اساس ساختن «الگوی بهینه» را تشکیل دهد. در این تحقیق طراحی و ساخت برنامه‌ای برای محاسبه عیار بار و نحوه تنظیم آن با توجه به ترمودینامیک فرایند انجام شده است. تکمیل الگوریتم ریاضی برنامه به منظور دستیابی به شرایط واقعی عمل، به در نظر گرفتن سینتیک واکنشها و محاسبات بهینه‌سازی نیاز دارد که می‌تواند در آینده مورد توجه و عمل قرار گیرد.

روش تحقیق

بار اصلی کوره‌های ذوب فلز عموماً عبارتند از: ۱ ـ بلوکه ها: معمولاً برای شروع کار در کوره القایی بار می‌شوند؛ ۲ ـ برگشتی‌ها: قسمتهایی از قطعات ریخته شده مانند راه‌گاه، تغذیه و قطعاتی که در تمیزکاری از قطعه ریختگی جدا می‌شوند؛ ۳ ـ قراضه ها: مواد و قطعات زاید نظیر کناره ورق پرس شده؛ ۴ ـ آلیاژسازها: موادی که برای رسیدن به ترکیب مورد نظر به فلز مذاب افزوده می‌شوند مانند فرو آلیاژها؛ ۵ ـ افزودنیهای فلزدار: نمونه‌ای از این مواد، آهن اسفنجی است که حاوی حدود ۹۰ درصد آهن است؛ ٦ ـ سرباره سازها: برای انجام عملیات تصفیه، ممکن است مواد سرباره‌ساز و کمک ذوب نیز به بار درون کوره افزوده شود.

فرض کنید در یک کورهٔ القایی با ظرفیت W، می‌خواهیم فلز مذابی دارای b_i درصد i را با کمترین هزینهٔ مواد اولیه تولید نمائیم و بهای وزن واحد هر ماده را با c_j کسر وزنی هر ماده را با x_j و درصد وزنی اجزاء هر ماده را با a_{ij} نشان دهیم، بطوریکه i نشاندهنده عنصر و j نشاندهنده ماده مورد نظر باشد:

$$i = 1 , 2 , \dots m \ ; j = 1 , 2 , \dots n \qquad (۱)$$

مسأله را برای یک کیلوگرم حل کرده و نتیجه را به W کیلوگرم نسبت می‌دهیم؛ زیرا جواب هر دو حالت یکی است. فرض کنید مواد بار شده وارد فلز مذاب شده و همانجا بمانند. بر اساس موازنه وزنی داریم:

$$b_1 = a_{1,1} x_1 + a_{1,2} x_2 + ... + a_{1,n} x_n$$

$$b_2 = a_{2,1} x_1 + a_{2,2} x_2 + ... + a_{2,n} x_n \qquad (۲)$$

. . . . .

$$b_m = a_{m,1} x_1 + a_{m,2} x_2 + ... + a_{2,n} x_n$$

روابط فوق بصورت ماتریسی چنین است:

$$A = a_{i,j} \quad و \quad X = x_j, \quad و \quad B = b_i \Rightarrow B = AX \qquad (۳)$$

حل دستگاه معادلات ۳ که از m معادله و n مجهول تشکیل شده است، به شرایط مسأله بررسی بستگی دارد:

۱ـ اگر m=n و «رتبه» ماتریس k=m و $B \neq 0$ باشد، ماتریس ضرایب A ماتریسی مربع با بردارهای دارای استقلال خطی نسبت به یکدیگر و دارای معکوس (A^{-1}) با ریشه های منحصر بفرد خواهد بود؛ بطوریکه:

$$X = A^{-1}B \qquad (۴)$$

۲ـ اگر m=n و رتبه ماتریس k=m و B=0 باشد، دستگاه معادلات همگن بوده و کلیهٔ ریشه ها برابر صفر خواهد بود. اما چنانچه m=n و B=0 و رتبه ماتریس k<m باشد، ضرایب A ماتریس ویژه‌ای تشکیل داده و بردار d در رابطه $x_k = d - Cx_{n-k}$ برابر صفر خواهد بود. لیکن به ازاء ارزشهای دلخواه برای x_{n-k}، دستگاه معادلات دارای ریشه خواهد بود.

۳ـ اگر n>m و رتبه ماتریس $k \leq m$ و بردار B با فضای برداری A سازگار باشد، جواب دستگاه از رابطهٔ عمومی $x_k = d - Cx_{n\,k}$ بدست خواهد آمد. استفاده از این رابطه برای وضعیتی است که بتوان مختصات d را به شرط واگذاری بردار B با A محاسبه نمود.

۴ـ اگر n<m باشد، دستگاه معادلات جواب ندارد؛ مگر آنکه ضرایب «m-n» معادله یا بیشتر، ترکیب خطی از ضرایب سایر معادلات باشند که در نتیجه با توجه به وضعیتهای رتبه k و بردار B می توان از قواعد ۱ الی ۳ برای حل چنین دستگاهی استفاده نمود [۱۱]. حال لازم است ترکیبی از x_jها را بدست آوریم که علاوه بر ارضاء دستگاه AX=B، بتواند هزینه بار را نیز به کمترین مقدار برساند، یعنی:

$$\text{Min } Z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + ... + c_n x_n \qquad (۵)$$

و درصورتیکه ضرایب هزینه یعنی c_jها را بصورت ماتریس سطری $C=c_jx_n$ بنویسیم، می‌توانیم آنچه تاکنون بیان گردید را به فرم ماتریسی زیر خلاصه نماییم:

$$\text{Min } Z = C X \qquad (۶)$$

بطوریکه:

$$AX = B \; ; \; x_j \geq 0 \; ; \; j = 1, 2, 3, ... \; n$$

روابط فوق، دارای فرم استاندارد مدلسازی از طریق برنامه ریزی خطی هستند.

چنانچه ترکیب شیمیایی بصورت یک تساوی بیان نشده باشد، می‌توان بصورت زیر عمل کرد:

۱ـ متغیرهای خفیف[1]: درصد عناصر نامطلوب مانند گوگرد و فسفر معمولاً بصورت یک نامساوی دارای حد بسته بالایی داده می‌شود؛ مثلاً $\%S \leq 0.025$. حال بسادگی می‌توانیم با افزودن یک متغیر مثبت به سمت چپ، نامساوی را به یک رابطه تساوی تبدیل کنیم: $\%S + S_1 = 0.025$. اکنون درصد گوگرد می‌تواند بین ۰ تا ۰/۰۲۵ تغییر نماید و متغیر S_1 اختلاف درصد گوگرد و ۰/۰۲۵ را نشان می‌دهد.

۲ـ متغیرهای اضافی[2]: اگر یک یا چند معادله بصورت نامساوی دارای حد بسته پائینی باشند، می‌توانیم از سمت چپ رابطه یک متغیر اضافی مثبت را کم کرده و نامساوی را به رابطه تساوی تبدیل کنیم [۱۲]:

$$\%Fe \geq 98 \quad \Rightarrow \quad \%Fe - S_2 = 98 \qquad (۷)$$

حل مسائل برنامه ریزی خطی به روشهای ترسیمی، جبری و سیمپلکس میسر است. روش سیمپلکس، روش جستجو برای یافتن حل بهینه است. در این روش مراحل زیر معمولاً انجام می‌شوند: ۱ـ یافتن حل ترسیمی؛ ۲ـ تعیین متغیری از متغیرهای غیرپایه (X_N) برای ورود به پایه و در نتیجه تشکیل یک پایه جدید بطوریکه مقدار هدف افزایش یابد؛ ۳ـ تعیین متغیری از متغیرهای پایه، برای خروج از پایه و تبدیل به متغیر غیرپایه بطوریکه تغییرات تابع هدف بیشترین مقدار را داشته باشد؛ ۴ـ تعیین عنصر گردش در نتیجه اعمال ۲ و ۳، ۵ ـ انتقال از پایه قدیم به پایه جدید (به وسیله عملیات سطری مقدماتی)؛ ۶ـ آزمون مطلوب بودن راه حل بدست آمده و ۷ـ ادامه عملیات تا رسیدن به جواب بهینه.

روش ترسیمی برای مسایلی که دو متغیره باشند، بسادگی قابل اعمال است. ناحیه مشترک بین نامعادلات یک دستگاه و شرط نامنفی بودن متغیرها که «ناحیهٔ عملی» خوانده می‌شود، بنیان روش سیمپلکس را تشکیل می‌دهد [۱۱]. با تعمیم نتایج روش ترسیمی، روش جبری استنتاج می‌شود. جواب نهایی، در روش جبری مختصات یکی از رئوس ناحیه عملی است. اگر مسأله دارای m نامعادله و n متغیر اصلی باشد، چون برای هر نامعادله یک متغیر (خفیف و یا اضافی) تعریف می‌شود، مسأله دارای m معادله و $m+n$ متغیر خواهد بود که دارای بینهایت جواب است. در اینجا باید برای حل دستگاه m معادله و $m+n$ مجهول، ریشه n متغیر را به دلخواه انتخاب نموده (مثلاً برابر صفر) و آنگاه دستگاه را برای تعیین ریشه‌های m متغیر باقی مانده حل نمائیم. آندسته از حلهایی که n متغیر برابر صفر در نظر گرفته شود و شرط نامنفی بودن متغیر را ارضاء کند، مختصات نقاط رئوس ناحیه عملی می‌باشد. چون حلهای مورد نظر مختصات یکی از رئوس است، لذا با تغییر متغیرهای پایه (m متغیر نامعلوم) و غیرپایه (n متغیری که برابر صفر در نظر گرفته شده‌اند)، رئوس مختلف را

---

1 - Slack Variable 2 - **Surplus Variable**

برای جواب بهینه می‌توان جستجو کرد [۱۱-۱۳].

اگر هر دو نقطه انتخابی از مجموعه را با خطی مستقیم به یکدیگر وصل کنیم و کلیه نقاط واقع بر خط جزو مجموعه باشند، مجموعه محدب[3] نامیده می‌شود. برای مثال:

$$a_1 \in s\ ,\ a_2 \in s\ ,\ l_1 a_1 + l_2 a_2 \in S :\ l_1 + l_2 = 1\ \ \&\ \ 0 < l_1\ ,\ l_2 < 1 \qquad (۸)$$

نقطه ای از یک مجموعه محدب که نتوان آن را بصورت یک ترکیب محدب از دو نقطهٔ دیگر مجموعه نوشت، نقطه حدی[4] نام دارد. حال با توجه به اینکه کدام n متغیر غیرپایه (برابر صفر) را از m+n متغیر درنظر بگیریم، جوابهای مختلفی حاصل می‌شود. ترکیبات مختلفی که می‌توان از m+n متغیر، ریشه های m تای آنها را احتمالاً حساب کرد از رابطه $C^m_{m+n} = m!\frac{(m+n)!}{n!}$ بدست می‌آید که البته بعضی از این ترکیبات ممکن است عملی نباشند. پس باید براساس یک روش جستجو به حل بهینه مسأله برسیم. برای این منظور ماتریس A را به دو زیر ماتریس B و N تقسیم می‌کنیم و ماتریس ستونی X را نیز به دو بخش پایه و غیرپایه X_B و X_N متناظر با بردارهای ماتریس A تقسیم می‌کنیم. اکنون با استفاده از خواص زیرماتریسها می‌توان نوشت:

$$A = (B\ \ N)\ \ \&\ X = \left(\frac{X_B}{X_N}\right)\ \ \Rightarrow\ \ AX = BX_B + NX_N = b \qquad (۹)$$

و چون می‌خواهیم به یک حل پایه‌ای دست یابیم، X_Nها را صفر درنظر می‌گیریم؛ زیرا X_Nها متغیرهای غیرپایه هستند:

$$BX_B + NX_N = b\ \ \Rightarrow\ \ BX_B = b\ \ \Rightarrow\ \ X_B = B^{-1}b \qquad (۱۰)$$

تابع هدف را نیز متناظر با تقسیم متغیرها به پایه و غیرپایه، به $C=(C_B\ C_N)$ تقسیم می‌کنیم که تابع هدف با حل ذکر شده در بالا بصورت زیر خواهد بود:

$$Z = CX = (C_B\ \ C_N)\left(\frac{X_B}{X_N}\right) = C_BX_B + C_NX_N = C_BX_B = C_BB^{-1}b \qquad (۱۱)$$

نرم‌افزار لازم برای حل معادلات فوق به کمک جریان‌نمای سیمپلکس طراحی و ساخته شده و برای چند مثال کاربردی مورد آزمایش قرار گرفت.

مثال عملی تولید فولاد ابزار SPK در کوره القایی فرکانس متوسط ۵۰۰ کیلوگرمی با آستر نوع بازی (مگنای ۹۵ شرکت فراوده‌های نسوز با مشخصات داده شده در جدول ۱ ماشین سازی اراک [۱۴] از برگشتیهای آلیاژی، فولاد فراضه کربنی و فروآلیاژ را مورد تحلیل قرار دادیم. مقدار فلز ۵۰۰ تا ۵۵۰ کیلوگرم، حجم فلز حدود ۷۱،۵۰۰ سانتیمتر مکعب و ارتفاع فلز پس از ریخته گری در کوکیلی با سطح مقطع

---

3 - Convex - Set 4 - Extreme - Points

۳۴٫۳۴ سانتیمتر، برابر ٦٢ سانتیمتر بود [۱۴].

مواد ذوب شدنی براساس تخمین اولیه، ۴۱۰ کیلوگرم قراضه، ۹۲ کیلوگرم فروکروم و ۳ کیلوگرم گرافیت بود که پس از توزین بطور ممتد بداخل کوره بار شد. ذوب شدن بین ۲ تا ۳ ساعت طول کشید. ترکیب شیمیایی فولاد حاصل در سطر ششم جدول ۱ ذکر گردیده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، محتوای منگنز فلز، از حد انتظار بیشتر بود. علت احتمالی افزایش منگنز، آلودگی کوره در اثر تولید فولاد پرمنگنز قبل از انجام این آزمایش بود.

محاسبات مربوط به عیارکردن بار بدون در نظرگرفتن تعادل بین ۴ فاز فلز، سرباره، آستر و گاز انجام شده و نشان می‌دهد که تنها بخش کوچکی از عناصر همراه بار از طریق واکنشهای تصفیه از محیط خارج می‌شود. میزان محاسبه شده اتلاف در سطر هفتم جدول ۱ ذکر شده است.

محاسبات تعادلی برای تولید فولاد مذابی با ترکیب شیمیایی ۰/۳۵٪ C، ۰/۱٪ Si، ۱/٦٪ Mn و ۰/۲٪ Cr و دمای ۱٦۰۰°C در یک کوره القایی، محتوای عناصر در حالت تعادل با سرباره‌ای با اکتیویته‌های $a_{SiO_2} = 0.1$ ، $a_{MnO} = 0.15$ و $a_{Cr_2O_3} = 0.2$ چقدر است؟

حل برای سادگی، فشار CO را برابر ۱/۱ اتمسفر درنظرگرفته و ضرایب اکتیوتیه را یک فرض می‌کنیم.

اکسیژن فولاد به ترتیب زیر محاسبه می‌شود: $\Delta G^{\circ}_{1,1873} = -96{,}000\ J \Rightarrow K_1 = \exp(\frac{-\Delta G^{\circ}_{1,1873}}{RT})$

$$K_1 = \frac{P_{CO}}{h_C.h_C} = 476 \Rightarrow [\%O] = \frac{1.1}{476_{\times}0.35} = 6.6_{\times}10^{-3}$$

سپس مقدار عناصر کربن ، منگنز و سیلیسیم در حالت تعادل را تعیین می‌کنیم:

$$\Delta G^{\circ}_{2,1873} = -157000\ J \qquad \Rightarrow \qquad K_2 = 23900$$

$$K_2 = \frac{a_{SiO_2}}{h_O^2.f_{Si}[\%Si]} = 23900 \Rightarrow [\%Si] = 9.6_{\times}10^{-2} \approx 0.1$$

$$\Delta G^{\circ}_{3,1873} = 9700\ Cal \qquad \Rightarrow \qquad K_3 = 7.3_{\times}10^{-2}$$

$$K_3 = \frac{h_O.f_{Mn}^1.[\%Mn]}{a_{MnO}}) \Rightarrow [\%Mn] = \frac{0.15}{6.6_{\times}10^{3}{}_{\times}7.3_{\times}10^{-2}} = 1.66 \Rightarrow [\%Mn] = 1.66$$

$$\Delta G^{\circ}_{4,1873} = 43500\ Cal \qquad \Rightarrow \qquad K_4 = 8.39\ _{\times}10^{-6}$$

$$K_4 = \frac{h_O^2.f_{Cr}^3}{a_{Cr_2O_3}} \quad \Rightarrow \quad 8.39_{\times}10^{-6} = \frac{(6.6x10^{-3})^2.\ fCr3[\%Cr]^3}{0.2} \quad \Rightarrow \quad [\%Cr] = 0.33$$

نتایج و بحث

برای حصول حداکثر سادگی، نرم افزار ساخته شده دارای سه بخش عمده است:

۱ـ بانک اطلاعاتی: به منظور سهولت انتخاب ماده، اصلاح ترکیب شیمیایی، مقایسه مواد، حذف موارد مکرر

و حذف داده‌های اضافی، یک بانک اطلاعاتی در نرم‌افزار ساخته شده تعبیه شده است. فرمانهای نرم‌افزار بوسیلهٔ کلیدهای پیکان‌دار، Enter و Esc مطابق استاندارد نرم‌افزاری CUA قابل اجرا بوده و در خط انتهای صفحه، نمایش داده می‌شوند. فرمانهای زیر در بخش Information قابل اجرا هستند:

- See All Kinds: رویت کلیه موادی که اطلاعات مربوط به آنها ثبت شده در سه ستون ۲۰ تایی.
- See Components: رویت ترکیب شیمیایی مواد بصورت جدولی.
- Enter: ورود اطلاعات جدید.
- Delete: حذف یک (یا چند) اطلاع انتخاب شده با اجرای کلید Enter.
- Correct: اصلاح اطلاعات.
- Search (%C): جستجوی نوع بخصوصی از مواد ثبت شده براساس محدوده درصد کربن.
- Optimize: محاسبه مقدار اجزای بار برای رسیدن به آنالیز مطلوب با حداقل هزینه.

۲ـ محاسبه ترکیب شیمیایی براساس مواد بار شده در کوره: ترکیب شیمیایی آلیاژ مذاب براساس موازنه جرمی و روابط ترمودینامیکی مربوط به اتلاف برخی از عناصر محاسبه شده و براساس مواد اضافه شده به کوره بدون درنظر گرفتن واکنشهای اکسیداسیون ارائه می‌گردند. نزدیکترین مقدار افزودنیها، برای رسیدن به عیار مطلوب تخمین زده شده و ترکیب فلز مذاب محاسبه می‌شود. چنانچه این ترکیب قابل قبول باشد، عملیات بارکردن آغاز می‌شود.

۳ـ محاسبهٔ بار برای رسیدن به آنالیز مطلوب باکمترین هزینه: در این بخش با در دست داشتن نوع و قیمت مواد، مناسبترین ترکیب بار باکمترین هزینه در اختیار قرار داده می‌شود. امکان درج قیمتها پس از انتخاب مواد نیز میسر است. هزینه فرایند بستگی به واکنشهای شیمیایی و اتلاف ماده در درون راکتور دارد. هرقدر مواد مورد استفاده خالصتر و واکنشهای تصفیه سریعتر باشند، هزینه تولید کمتر خواهد بود.

نتیجه گیری

شبیه سازی فرایند ذوب و تصفیه فولاد در کوره الکتریکی القایی با استفاده از موازنه‌های جرمی و حرارتی و واکنش اکسیداسیون چهار عنصر مهم با ویژگیهای زیر انجام شده است:

- مشخص بودن «تابع هدف» بصورت خطی.
- امکان ارائه راه‌حلهای مختلف با استفاده از ترکیب منابع و محدودیتهای موجود.
- امکان بیان محدودیتهای منابع بصورت معادلات یا نامعادلات خطی.
- موجود بودن روابط ریاضی بین متغیرهای طراحی و اجرا.

● غیرمنفی بودن متغیرها.

مقایسه اطلاعات تجربی با کمیتهای محاسبه شده، نشانگر فواید استفاده از روش شبیه‌سازی است.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی دو نوع سرباره که بصورت «از پیش تعیین شده» به برنامه داده شده است را نشان می‌دهد. استفاده از ارقام جدول ۲ در شرایطی که اطلاعات دقیقتری در مورد ترکیب شیمیایی و اکتیویته سرباره در اختیار کاربر نباشد، حل مسأله را آسان می‌سازد. اما بهتر است ترکیب سرباره توسط چند آزمایش تعیین و به جای ارقام جدول ۲ مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان ترکیب شیمیایی نهایی فولاد مذاب را در نظر گرفته و با چند بار سعی و خطا با همین نرم افزار، محدودهٔ اکتیویته و ترکیب شیمیایی سرباره را تعیین کرد. بدیهی است چنانچه برای یک کلاس معین فولاد، تست فوق چند بار تکرار شود، نتایج حاصل از دقت بیشتری برخوردار خواهد بود. بنابراین اگر شرایط تعادل مطابق صورت مسأله باشد، ترکیب شیمیایی مطلوب بدست خواهد آمد.

بدلیل رفتار پیچیده سرباره‌ها، واکنشهای اکسیداسیون در فولاد بطور کامل قابل پیش‌بینی نمی‌باشند. گرچه نظریه‌های مختلفی برای بیان مشخصات سرباره‌ها ذکر شده است، اما هنوز هم کمّی کردن واکنشهای اکسیداسیون، طبق روابط ترمودینامیکی دارای محدودیتهای فراوانی از جمله ضرایب اکتیویته عناصر و ترکیبات است. انجام اینگونه محاسبات برای تخمین درصد عناصر باقیمانده در فولاد، مفید خواهد بود. تکمیل محاسبات تعادلی، سرعت واکنشها و حداقل کردن هزینه‌های تولید به‌منظور دستیابی به طرح بهینه از جمله اهداف آتی طرح است که در ویرایشهای بعدی نرم افزار می‌بایست ملحوظ شوند.

قدردانی

از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه بخاطر حمایت از این تحقیق قدردانی می‌نماییم.

مراجع

1. K. Sadrnezhaad, ***J. of Engineering***, I.R.Iran, Vol. 3, Nos. 1&2, 1990, pp. 37-47.

2. K. Sadrnezhaad, ***J. of Engieering***, I.R.Iran, Vol. 4, Nos. 1&2, 1991, pp. 65-72.

3. R.C. Sharma, V.R. Lakshmanan and J. Kirkaldy, ***Metall. Trans. A***, 1984, 15, 545.

4. K. Balasubramanian and J.S. Kirkaldy, ***CALPHAD***, 1986, 10, 2, 187.

۵. س. خ. صدرنژاد و غ. نعمتی، نشریه مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، سال ۷، شماره ۲، ۱۳۷۴، ص‌ص. ۲۷-۵۱.

٦. س. خ. صدرنژاد، جوزانی و خمامی زاده، مجله بین‌المللی مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، جلد ۱، ۱۳۶۹، ص‌ص. ۴۱-۵۵.

7. K . Sadrnezhaad and A. Simchi, ***Journal of Materials Science and Technology***, Vol. 15, No. 2, 1999, pp 121-127.

8. K . Sadrnezhaad, ***Iron and Steel International***, 1981, pp 309-314.

9. K . Sadrnezhaad and J. F. Elliott, ***Iron and Steel Intern.***, 1980, pp. 327-339.

10. K . Sadrnezhaad, ***Scientia Iranica***, Vol 3, Nos. 1,2,3, 1996, pp 113-119.

۱۱. م. ج. اصغرپور، «برنامه ریزی خطی»، چاپ پنجم ، دانشگاه تهران، ۱۳۷۵.

۱۲. م. آریانژاد، «برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم کار ماکار»، چاپ دوم، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۷۲.

۱۳. خ. صدرنژاد، «فرایندهای سینتیکی در مهندسی مواد و متالورژی»، انتشارات امیرکبیر، تهران، ۱۳۷۲.

۱۴. س. خ. صدرنژاد، ت. اکبریان و م. سرکمری، «شبیه سازی فرایند تولید فولاد در کوره القایی»، کارنامه پژوهشی شریف، دانشکده مهندسی متالورژی، ۱۳۷۵، ص.ص. ۱۲۵-۱۱۷.

جدول ۱ - مشخصات بار، فلز و آستر کوره القایی مورد استفاده برای ساخت فولاد.

بار	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)																	
	C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	S	P	N	H	H_2O	MgO	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	Al_2O_3	خاکستر
فرمه	۰/۱۲۸۵	۰/۱۲۰۶	۰/۶۲۲۲	۰/۰۴۱۹	۰/۱۰۲۲	۰/۰۳۳۳	۰/۰۳۷۲	۰/۰۲۲۲									
فروکروم	۸ - ۵	۷۷-۶۵		۱			۰/۰۴	۰/۰۳									
پودرگرافیت	۹۹	۰/۰۱					۰/۰۵		۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۲						۰/۳
آستر کوره												۹۲	۴	۲/۵	۱/۵	۱	
فلز حاصل	۱/۰۲۱	۱۲/۵۰	۰/۰۱۷*	۰/۲۱۱۲	۰/۰۲۲۱	۰/۰۲۵۸	۰/۰۲۷	۰/۰۲۵									
نتیجه محاسبه	۱/۸۹	۱۲/۰۵	۰/۲۰۹۶	۰/۲۱۵۲	۰/۰۸۲۹	۰/۰۱۷۸	۰/۰۲۰	۰/۰۱۲									
اتلاف (درصد)	-	۲/۱	-	-	-	-	-	-									

* احتمال ورود عنصر از طریق آلودگی مربوط به بارهای قبلی.

جدول ۲ - ترکیب شیمیایی دو نوع سرباره مورد استفاده در نرم افزار.

ماده	FeO	MnO	CaO	MgO	SiO_2	P_2O_5	Al_2O_3	Cr_2O_3	نوع سرباره
درصد وزنی	14	7	48	9	16	2	2	2	بازی
کسر مولی	0.12	0.06	0.50	0.13	0.16	0.01	0.01	0.01	
درصد وزنی	13	16	4	-	58	-	6	3	اسیدی
کسر مولی	0.12	0.15	0.05	-	0.63	-	0.04	0.01	