شبیه سازی فرایند تولید فولاد در کوره القایی ×

سید خطیب الاسلام صدرنژاد (استاد)

مهرداد سرکمری (کارشناس)

چکیده

در این تحقیق بهینه سازی مواد اولیه با استفاده از روش برنامه ریزی خطی برای تولید فولاد مذاب در یک کوره الکتریکی القایی شبیه سازی شده است. برنامه نویسی بر اساس موازنه های جرمی، قوانین تعادل و شیوه حداقل کردن هزینه ها انجام شده است. نرم افزار حاصل قادر به پیش بینی مطلوب ترین شیوه بارگیری با وجود نوسانات دائمی در شرایط، نوع، ترکیب و هزینه مواد سازنده و کمک به انجام محاسبات مربوط به تعیین ضرایب اکتیویته با استفاده از در صدهای تجربی اتلاف مواد، می باشد.

×- در این مقاله بخشی از نتایج بدست آمده در رابطه با طرح تحقیقاتی "شبیه سازی فرایند تولید فولاد در کوره القایی" ارائه می شود.

مقدمه

تولید و بکارگیری «الگوی های بهینه سازی» یا «مدل های برنامه ریزی»، برای حل مسایل نظامی ، سیاسی ، اقتصادی ، صنعت و مدیریت، طی دهه های اخیر، اهمیت به سزایی یافته است [۱]. مبنای تدوین این مدلها، عموماً بر حداکثر کردن منافع قرار دارد [۲]. در الگو سازی حاضر، حداقل کردن هزینه تولید فلز مذاب، اساس کار قرار گرفته است [۳]. مواد بار شونده به کوره القایی معمولاً عبارتند از:

۱ـ بلوکه ها: این مواد برای شروع ذوب در کوره های القایی بار می شوند.

۲ـ فلزات برگشتی: تکه های زاید قطعات ریخته شده مانند راهگاه و تغذیه که در مرحله تمیز کاری از قطعه اصلی جدا شده و مورد استفاده دیگری ندارند .

۳ـ قراضه ها: ضایعات فلزی نظیر انتهای پرس نشده ورقها و مواد مستعمل ساخته شده از فلز نیز می توانند به عنوان بار کوره به کار گرفته شوند.

۴ـ مواد آلیاژ کننده : مواد فروآلیاژی ممکن است به منظور حصول ترکیب مورد نظر یا ریز کردن دانه ها به فلز مذاب افزوده شوند.

۵ـ مواد سرباره ساز : برای انجام عملیات فولاد سازی، ممکن است مواد سرباره ساز و مواد کمک ذوب نیز به بار درون کوره افزوده شود. این کار به ویژه در کوره های قوس الکتریکی متداول است.

بسته به ترکیب شیمیایی و خصوصیات فیزیکی، مواد اولیه فوق قیمتهای متفاوتی دارند. لکن از آنجا که قیمت فروآلیاژها عموماً بیشتر است، لذا بایستی سعی شود که عناصر همراه حتی الامکان از طریق ردیفهای ۱ تا ۳ تأمین شوند؛ به طوریکه میزان نیاز به مواد فرو آلیاژی به حداقل خود برسد. این موضوع، اساس ساختن «الگوی بهینه» را در این تحقیق تشکیل می دهد. برای انجام اینکار در اینجا از «مدل برنامه ریزی» استفاده شده است.

ویژگیهای برنامه ریزی خطی به قرار زیر است :

- مشخص بودن «تابع هدف» به صورت خطی.
- امکان ارائه راه حل های مختلف با استفاده از ترکیب منابع و محدودیت های موجود.
- امکان بیان محدودیتهای منابع به صورت معادلات یا نامعادلات خطی.
- موجود بودن روابط ریاضی بین متغیرهای طراحی و اجرا.
- غیرمنفی بودن متغیرها $(x \geq 0)$ [۱].

مدل سازی

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

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

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

$$b_1 = a_{1,1} x_1 + a_{1,2} x_2 + \dots + a_{1,n} x_n \qquad (۲)$$

$$b_2 = a_{2,1} x_1 + a_{2,2} x_2 + \dots + a_{2,n} x_n$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

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

روابط فوق به صورت ماتریسی چنین است:

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

حل دستگاه (۳) که از m معادله و n مجهول تشکیل شده است، به شرایط 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؛ به طوری که:

$$X = A^{-1}B \qquad (۴)$$

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 ویژه ای 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[۱]. 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:

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

و در صورتی که ضرایب هزینه یعنی c_jها را بصورت ماتریس سطری $C=(c_j)_{1\times n}$ بنویسیم، می‌توانیم آنچه تاکنون بیان گردید را به فرم ماتریسی زیر خلاصه نماییم:

$$\text{Min } Z = C\,X \qquad (۶)$$

بطوریکه:

$$AX = B\,;\, xj \geq 0\,;\, j = 1, 2, 3, \dots n$$

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

چنانچه ترکیب شیمیایی بصورت یک تساوی بیان نشده باشد، می توان به صورت زیر عمل کرد:

۱ـ متغیرهای خفیف[1]: درصد عناصر نامطلوب مانند گوگرد و فسفر معمولاً به صورت 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 می دهد[۴].

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

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

بهینه سازی

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 می شوند:

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 به طوریکه تغییرات تابع هدف

1 - Slack Variable

2 - Surplus Variable

بیشترین مقدار باشد.

۴ـ تعیین عنصر گردش در نتیجه اعمال ۲ و ۳.

۵ـ انتقال از پایه قدیم به پایه جدید (به وسیله عملیات سطری مقدماتی).

۶ـ آزمون مطلوب بودن راه حل بدست آمده.

۷ـ ادامه عملیات تا رسیدن به جواب بهینه.

روش ترسیمی برای مسایلی که دو متغیره باشند، به سادگی قابل اعمال است. ناحیه مشترک بین نامعادلات یک دستگاه و شرط نامنفی بودن متغیرها که «ناحیهٔ عملی» خوانده می‌شود، بنیان روش سیمپلکس را تشکیل می دهد [۱]. با تعمیم نتایج روش ترسیمی، روش جبری استنتاج می‌شود. جواب نهایی، در روش جبری مختصات یکی از رئوس ناحیه عملی است. اگر مسئله دارای m نامعادله و n متغیر اصلی باشد، چون برای هر نامعادله یک متغیر (خفیف و یا اضافی) تعریف می‌شود، مسئله 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 حل هایی که n متغیر برابر صفر در نظر گرفته شود و شرط نامنفی بودن متغیر را ارضاء کند، مختصات نقاط رئوس ناحیه عملی می‌باشد. چون حل های 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 شده اند)، رئوس مختلف را برای جواب بهینه می توان جستجو کرد [۱و۴].

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[1] نامیده می شود. برای مثال:

$$a_1 \in s \ , \ a_2 \in s \ , \ l_1a_1 + l_2a_2 \in S : l_1 + l_2 = 1 \ \& \ 0 < l_1 \ , \ l_2 < 1 \qquad (۸)$$

نقطه ای از یک مجموعه محدب که نتوان آن را بصورت یک ترکیب محدب از دو نقطهٔ دیگر مجموعه نوشت، نقطه حدی[2] 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 $C^m_{m+n} = \frac{(m+n)!}{n!\ m!}$ بدست می‌آید که البته بعضی از این ترکیبات ممکن است عملی نباشند. پس باید براساس یک روش جستجو به حل بهینه مسئله برسیم. برای این منظور

1 - Convex - Set

2 - Extreme - Points

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 پایه ای 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:

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

در جدول ۲، x_{Bi} نشان دهنده متغیر پایه موجود در ردیف iام، $y_{i,0}$ نمایشگر ارزش $B^{-1}b$ در ردیف iام، $y_{0,j}$ برحسب آنکه x_j متغیر پایه و یا غیرپایه باشد، برابر صفر و یا عنصری از بردار $C_BB^{-1}\,N\text{-}C_N$ و سرانجام $y_{0,0}$، نشان دهنده ارزش تابع هدف (z) است. با توجه به جدول ۲، جریان نمای سیمپلکس به سادگی قابل ارائه خواهد بود.

نتایج

برای حصول حداکثر سادگی، سه بخش عمده در نرم افزار ساخته شده طی این تحقیق در نظر گرفته شده است:

۱ـ بانک اطلاعاتی: با توجه به تعدد مواد و عناصر، یک بانک اطلاعاتی به منظور سهولت انتخاب ماده، اصلاح ترکیب شیمیایی، مقایسه مواد، حذف موارد مکرر و حذف داده‌های اضافی طراحی شده است.

اعمال نرم افزار بوسیلهٔ کلیدهای فلش چپ، فلش راست، فلش بالا، فلش پایین، Enter و Esc مطابق استاندارد نرم افزاری CUA طراحی شده است. مختصری از اعمال کلیدها نیز در خط انتهای صفحه، نمایش داده می‌شود. در بخش Information اعمال زیر قابل انجام است:

- رویت کلیه موادی که اطلاعات مربوط به آنها ثبت شده‌اند، تحت عنوان See All Kinds در سه ستون ۲۰ تایی.
- رویت ترکیب شیمیایی مواد تحت عنوان See Components به صورت جدولی.

- ورود اطلاعات جدید تحت عنوان Enter.
- حذف یک (یا چند) اطلاع تحت عنوان Delete از طریق علامتگزاری و اجرای کلید Enter.
- اصلاح اطلاعات تحت عنوان Correct.
- جستجوی نوع بخصوصی از مواد ثبت شده براساس محدوده درصد کربن تحت عنوان Search (%C).

۲ـ محاسبه ترکیب شیمیایی آلیاژ براساس مواد اضافه شده به کوره: ترکیب شیمیایی آلیاژ مذاب براساس موازنه جرمی و روابط ترمودینامیکی [۵ـ۸]مربوط به اتلاف برخی از عناصر محاسبه شده و براساس مواد اضافه شده به کوره بدون درنظرگرفتن واکنشهای اکسیداسیون ارائه می گردند. نزدیکترین مقدار افزودنیها، برای رسیدن به عیار مطلوب تخمین زده شده و سپس ترکیب فلز مذاب محاسبه می شود. چنانچه این ترکیب قابل اصلاح باشد، عملیات بارکردن را می توان آغاز نمود.

۳ـ محاسبهٔ بار برای رسیدن به آنالیز مطلوب باکمترین هزینه: در این بخش با در دست داشتن نوع و قیمت مواد، مناسب ترین ترکیب بار باکمترین هزینه در اختیار قرار داده می‌شود [۳]. امکان ورود قیمت مواد پس از انتخاب مواد نیز میسر است.

بحث و نتیجه‌گیری

بدلیل رفتار پیچیده سرباره‌ها، واکنشهای اکسیداسیون در فولاد به طور کامل قابل پیش‌بینی نمی‌باشند. گرچه نظریه های مختلفی برای بیان مشخصات سرباره ها ذکر شده است، اما هنوز هم کمّی کردن واکنشهای اکسیداسیون، طبق روابط ترمودینامیکی دارای محدودیتهای فراوانی است. انجام اینگونه محاسبات برای تخمین درصد عناصر باقیمانده در فولاد، مفید خواهد بود. در نرم افزار ساخته شده، واکنش اکسیداسیون چهار عنصر مهم درنظرگرفته شده است:

$$[C] + [O] = CO_{(g)} \quad ; \quad K_1 = \frac{P_{CO}}{h_C . h_O} = \frac{P_{CO}}{f_C[\%C] f_O[\%O]} \qquad (۱۲)$$

ثابت تعادل در دمای T مشخص است؛ P_{CO} نیز تابع شرایط فیزیکی یعنی ارتفاع و وزن مخصوص سرباره و فلز مذاب و فشارکلّ سیستم است. بنابراین می توان با درنظرگرفتن درصد کربن، مقدار اکسیژن و سایر عناصر در حال تعادل را محاسبه نمود. معادله چندجمله‌ای وابستگی اکتیویته و ضریب اکتیویته f_i° به کسرمولی به قرار زیر است : [۸]

$$a_i = f_i^{\circ} . X_i + 2(1-f_i^{\circ}). X_i^2 + (f_i^{\circ} - 1) X_i^3 \qquad (۱۳)$$

جدول ۱ ترکیب شیمیایی دو نوع سرباره که به صورت «از پیش تعیین شده» به برنامه داده شده است، را

نشان می دهد. استفاده از ارقام جدول ۱ در شرایطی که اطلاعات دقیق‌تری در مورد ترکیب شیمیایی و اکتیویته سرباره در اختیار کاربر نباشد، حل مسأله را آسان می سازد. اما بهتر است ترکیب سرباره توسط چند آزمایش تعیین و به جای ارقام جدول ۱ مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می توان 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.

مثال عددی قرار است فولاد مذابی با ترکیب شیمیایی و دمای زیر در یک کوره القایی تهیه شود:

$T = ۱۶۰۰\dot{C}$

%C	%Si	%Mn	%Cr
0.35	0.1	1.6	0.3

بررسی کنید که محتوای عناصر در حالت تعادل با سرباره‌ای با اکتیویته های $a_{SiO2} = 0.1$، $a_{MnO} = 0.15$ و $a_{Cr2O3} = 0.2$ چه مقدار است؟ فشار CO برابر 1.1 اتمسفر درنظر بگیرید و ضرایب اکتیوتیه را نیز برابر یک درنظر بگیرید.

راه حل ابتدا درصد اکسیژن را تعیین می‌کنیم:

الف) $\Delta G^{\circ}_{1,1873} = -96000\ j \Rightarrow K_1 = \exp\left(\frac{-\Delta G^{\circ}_{1,1873}}{RT}\right) = 476$

$$K_1 = \frac{P_{co}}{h_c.h_c}) \Rightarrow 476 = \frac{1.1}{f_c.[\%O]f_c[\%C]} \Rightarrow [\%O] = \frac{1.1}{476_x 0.35} = 6.6_x10^{-3}$$

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

ب) $\Delta G^{\circ}_{2,1873} = -157000\ j \Rightarrow K_2 = 23900$

$$K_2 = \frac{a_{SiO2}}{h_O{}^2.f_{Si}[\%Si]} \Rightarrow 23900 = \frac{0.1}{(6.6_x10^{-3})^2\ [\%Si]} \Rightarrow [\%Si] = 9.6_x10^{-2} \approx 0.1$$

ج) $\Delta G^{\circ}_{1,1873} = 9700\ cal \Rightarrow K_3 = 7.3_x10^{-2}$

$$K_3 = \frac{h_O.f_{Mn}{}^1.[\%Mn]}{a_{MnO}}) \Rightarrow [\%Mn] = \frac{0.15}{6.6_x10^{-3}\ _x7.3_x10^{-2}} = 1.66 \Rightarrow [\%Mn] = 1.66$$

د) $\Delta G^{\circ}_{4\,1873} = 43500\ cal \quad \Rightarrow \quad K_4 = 8.39 \times 10^{-6}$

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

نتیجه چنانچه شرایط تعادل مطابق صورت مسأله باشد، ترکیب شیمیایی مورد نظر حاصل خواهد شد.

قدردانی

از مسئولین حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه بخاطر حمایت از این تحقیق قدردانی می نماییم.

مراجع

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

۲) س.خ. صدرنژاد، «فرایندهای سینتیکی در مهندسی مواد و متالورژی»، امیرکبیر، ۱۳۷۲.

۳) س.خ. صدرنژاد، ت. اکبریان و م. سرکمری، «شبیه سازی فرایند تولید فولاد درکوره القایی»، کارنامه پژوهشی شریف، دانشکده مهندسی متالورژی، ۱۳۷۵.

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

5) J. F. Elliott, "The chenistry of electric furnace", I&SM, (1975), 34-43.

٦) ا. پاکزاد، «فولادسازی درکوره‌های زیمنس مارتین»، چاپ اول، نشر دانشگاهی تهران، ۱۳٦٦.

7) R. G. Ward, "An introduction to the physical chemistry of iron and steelmaking", Edward Arnold, London, 1961.

8) D. R. Gaskell, "Introduction to Metallurgical Thermodynamics", McGraw-Hill, U.S.A., 1981.

۹) ن. توحیدی، «ترمودینامیک مهندسی متالورژی» ، دانشگاه تهران ، ۱۳۷۰.

جدول ۱ - جدول متغیرها در روش سیمپلکس.

	x_1	x_2 ...	x_j ...	x_n	ارزش x_B , z
Z	$y_{0,1}$	$y_{0,2}$ ...	$y_{0,j}$ ...	$y_{0,n}$	$y_{0,0}$
x_{B1}	$y_{1,1}$	$y_{1,2}$ ...	y_{1j} ...	$y_{1,n}$	$y_{1,0}$
x_{B2}	$y_{2,1}$	$y_{2,2}$	$y_{2,n}$	$y_{2,0}$	
.	.	.		.	.
.	.	.		.	.
.	.	.		.	.
x_{Bi}	.	.		.	$y_{i,0}$
.	.	.		.	.
.	.	.		.	.
.	.	.		.	.
x_{Bm}	$y_{m,1}$	$y_{m,2}$		$y_{m,n}$	$y_{m,0}$

جدول ۲ - ترکیب شیمیایی دو نوع سرباره مورد استفاده در نرم افزار [۶].

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