

بهینه‌سازی کوره دوار سیمان به کمک الگوریتم ژنتیکی

علیرضا زنجانی ثابت و محمد تقی صادقی*

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه کنترل و شبیه‌سازی فرایندها

پیام نگار: sadeghi@iust.ac.ir

چکیده

کوره دوار سیمان به دلیل نقشی که در تولید سیمان و مصرف انرژی دارد، یکی از مهمترین اجزای کارخانه سیمان محسوب می‌شود. کارهای بسیار گسترده‌ای در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی کوره‌های دوار سیمان انجام گرفته و انواع مدل‌های ایستایی و دینامیکی برای آن ارائه شده است. عملکرد این کوره بسیار مهم است و بر کیفیت سیمان و مقدار سوخت مصرفی و هزینه عملیاتی، تاثیر به سزایی دارد. در این تحقیق، سعی شده است یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی کوره دوار سیمان انتخاب شود تا برای اجرای الگوریتم بهینه‌سازی از آن، استفاده گردد. با توجه به ارتباط پیچیده پارامترهای طراحی و عملیاتی کوره با کیفیت سیمان تولیدی و نیز سوخت مصرفی، از روش قدرتمند الگوریتم ژنتیکی برای بهینه‌سازی استفاده شد. با بهینه‌سازی کوره دوار سیمان به منظور تولید سیمان با کیفیت‌های خاص توسط الگوریتم ژنتیکی، پارامترهای بهینه فرایند به دست آمد.

کلمات کلیدی: کوره دوار سیمان، مدل‌سازی، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیکی

۱- مقدمه

پس از دیگری نکته‌ای به آن افزوده‌اند ولی تا کنون مدل مشخص و معلومی که بتوان توسط آن کوره سیمان را بطور کامل تحلیل کرد ارائه نکرده‌اند. مدل‌های یکنواخت شامل مدل فریش [۳]، واتکینسون و بریماکوب [۴ و ۵]، و همچنین، مدل‌های دینامیکی، شامل مدل استاینرسلاید [۶]، متزر [۷] و اسپنگ [۸] می‌باشند. فریش، شبیه‌سازی یکنواخت کوره دوار مجهز به پیش‌گرمکن و پیش‌تکلیس‌کننده (کلسیناتور) را ارائه کرده است. اساس کار بر مبنای تقسیم کوره در جهت طولی به تعدادی اجزاء (عناصر) و نوشتن موازنه جرم و انرژی برای این اجزاء و حل دستگاه معادلات ناخطی حاصل بر حسب دماست [۳]. واتکینسون و بریماکوب از یک کارگاه آزمایشگاهی کوره دوار استفاده کرده‌اند که در آن، از پنجاه و دو ترموکوپل (زوج گرمایی) برای اندازه‌گیری دما در طول‌ها و عمق‌های متفاوت استفاده شده است. این شبیه‌سازی، واکنش‌ها را نیز در نظر

سیمان‌ها مواد چسبنده‌ای هستند که قابلیت چسباندن ذرات به یکدیگر و به وجود آوردن جسم یک‌پارچه از ذرات متشکله را دارند. آنچه از کلمه سیمان مد نظر است، نوعی از سیمان است که دارای ریشه آهکی می‌باشد [۱].

قسمت اصلی عمل پخت سیمان در کوره صورت می‌گیرد. کوره سیمان، یک استوانه فلزی است که طول و قطر آن متناسب با ظرفیت کارخانه است [۱]. در راه مدل‌سازی کوره دوار، از معادلات مربوط به جرم و انرژی و سرعت واکنش‌ها و فرمول‌های مربوط به پارامترهای متغیر در داخل کوره، نظیر ضرایب انتقال گرمای جابجایی، رسانش و تابش و گرمای واکنش‌ها و دیگر پارامترها استفاده می‌شود [۲]. کوره دوار سیمان و مدل‌سازی آن بحثی است که از سال‌ها قبل محققین بسیاری بر روی آن کار کرده و هر کدام

طراحی و میزان مواد اولیه است. برای حل این مدل و پیدا کردن مقادیر پارامترهای ذکر شده باید از روشی استفاده شود که بتواند شبیه‌سازی پیچیده ارائه شده برای کوره سیمان را حل کند.

اکثر روش‌های بهینه‌سازی که بر اساس روش جستجو با استفاده از مشتق تابع هدف، شکل گرفته‌اند به معادلاتی خطی یا ناخطی از مدل احتیاج دارند که بتوانند الگوریتم شبیه‌سازی را تشکیل داده و حل کنند. از آنجا که معادلات به‌کار رفته در کوره دوار سیمان، معادلات دیفرانسیلی با شیب‌های متغیر و زیاد می‌باشند و اینکه روش‌های فوق، اکثراً در حالت‌هایی که ناخطی بودن معادلات زیاد است در ماکزیمم‌ها و مینیمم‌های محلی در دام می‌افتند، این روش‌ها برای حل مسایل پیچیده، بسیار ناکارآمد و در برخی از موارد غیر عملی می‌باشند [۱۷].

الگوریتم ژنتیکی یکی از انواع الگوریتم‌های قدرتمند جستجو است که بر مبنای انتخاب طبیعی و ژنتیکی طبیعی عمل می‌کند و در حل مسائل بهینه‌سازی قابل به کارگیری است. نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیکی حاکی از توانایی این روش در بهینه‌سازی فرایندها با مدل‌های پیچیده و سخت، همراه با شرایط محدودکننده و پارامترهای زیاد می‌باشد. تکامل یک فرایند بهینه‌سازی، مبتنی بر تغییرات تصادفی تدریجی نمونه‌های مختلف در یک جمعیت و انتخاب درست آنهاست. با مدل‌سازی این فرایند می‌توان یک تکنیک بهینه‌سازی آماری به دست آورد که امروزه در مسائل پیچیده مختلف و بخصوص مسائل طراحی، کارایی خود را نشان داده است. در این الگوریتم، اثر کدهای ژنتیکی در ترکیب و انتقال اطلاعات و همچنین فرایند انتخاب طبیعی بر اساس سازگاری موجود با شرایط زیست محیطی، مدل‌سازی شده است. روش الگوریتم ژنتیکی در حل مسائل مختلف بهینه‌سازی که روش‌های مرسوم بهینه‌سازی برای آنها نامناسب می‌باشد، قابل به کارگیری است. این نوع مسائل عبارتند از مسائلی که تابع هدف در آنها به صورت ناپیوسته، مشتق‌ناپذیر، شدیداً ناخطی و نوسانی است [۱۸].

۲- ارائه مدل

کوره دوار سیمان به دلیل واکنش‌هایی که در آن اتفاق می‌افتد سیستمی پیچیده بوده و کارکرد آن به متغیرهای بسیاری وابسته است. انتقال جرم و گرما بین گاز و جامد بستگی مستقیم به

گرفته و با ارائه فرمولی برای انحراف موضعی، مدل خود را تا حدودی ارزیابی کرده است [۵ و ۴]. اولین مدل دینامیکی توسط سایلند ارائه شده است. در این مدل، معادله‌های نوشته شده بی بعد گشته، غبار در طول کوره، ثابت فرض شده و سرعت‌های جریان جرمی گاز و جامد و ضرایب انتقال گرما ثابت فرض شده‌اند [۶]. مدل بعدی توسط متزر بیان شد. در این مدل، محقق، کوره و کولر را با هم در نظر گرفت و فقط موازنه‌های مربوطه و روش‌های خطی کردن معادلات حاصل از موازنه را بیان کرده (معادله‌های نوشته شده در این مدل به صورت بی بعد است) و هیچ‌یک از معادلات را حل نکرده و در ضمن، تاثیر غبار و واکنش‌های شیمیایی را در نظر نگرفته است. سرعت جریان‌های جرمی گاز و جامد ثابت فرض شده‌اند [۷]. سومین مدل دینامیکی توسط اسپنگ ارائه گردید. این محقق در مدل خود سرعت انجام واکنش‌های شیمیایی در داخل کوره را در نظر گرفته و به دلیل رسیدن سریع گاز به حالت پایدار، برای دمای گاز، حالت پایدار را تخمین زده است. ضمناً مدلی برای مشعل ارائه شده که برای سوخت جامد یا مایع مناسب به نظر می‌رسد و شعله به صورت یک واکنش گرمازا بررسی می‌گردد، که این گرمایش، مستقیماً به گاز منتقل می‌شود. در این مدل، اثر غبار در نظر گرفته نشده است [۸]. مدل‌های دینامیکی متفاوت دیگری نیز رفتار کوره سیمان را پیش‌بینی می‌کنند. این مدل‌ها از ساده‌ترین نوع (مدل جعبه سیاه به عنوان تابع انتقال) [۱۰ و ۹] تا پیچیده‌ترین مدل سه بعدی [۱۱] ارائه شده‌اند.

در این تحقیق، سعی بر آن است که با مطالعه مدل‌های مختلف ارائه شده، یک روش مدل‌سازی که قادر باشد رفتار کوره را در اثر تغییر پارامترها پیش‌بینی کند ارائه گردد. با توجه به اهمیت سیمان در اقتصاد یک کشور و نرخ رشد اقتصادی آن، کارخانجات سیمان به صنایع استراتژیک تبدیل شده‌اند. بهینه‌کردن کارخانه سیمان می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. هدف نهایی این تحقیق، بهینه‌سازی کوره دوار سیمان برای تولید سیمان‌های خاص با تغییر پارامترهای طراحی و عملیاتی به‌وسیله الگوریتم ژنتیکی می‌باشد. در این راه به تبیین روشی پرداخته شده که به کمک آن بتوان از شبیه‌سازی ارائه شده استفاده کرد و کوره دوار را به منظور افزایش تولید سیمان‌های خاص (سیمان پرتلند، تیپ‌های ۲، ۳ و ۴) بهینه نمود. این کار، مستلزم بهینه‌کردن پارامترهای عملیاتی، پارامترهای

- تمام سوخت به دی اکسید کربن و آب تبدیل می شود.
 - سرعت واکنشها توسط قانون آرنیوس تعیین می گردد.
- تغییرات غلظت هر یک از مواد بر حسب زمان در هر سطح مقطع معادل مقداری که توسط جریان در عنصر حرکت می کند بعلاوه مقدار تولید شده، منهای مقدار مصرفی در عنصر در نظر گرفته می شود. بنابراین فرم کلی معادلات موازنه جرم به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = -V_s \frac{\partial k}{\partial z} + R(k) \quad (1)$$

که در آن k غلظت یک ماده مشخص و $R(k)$ مقدار تولید شده است. از آنجا که بررسی تاثیر پارامترها بر روی تولید مورد نظر می باشد، برای بهینه سازی کوره دوآر سیمان، یک مدل یکنواخت، مورد نیاز است. بنابراین فقط حالت های یکنواخت کوره در نظر گرفته شده و حالت های شروع به کار، خاموش کردن کوره و یا شوک های ناگهانی کوره مورد نظر نیستند.

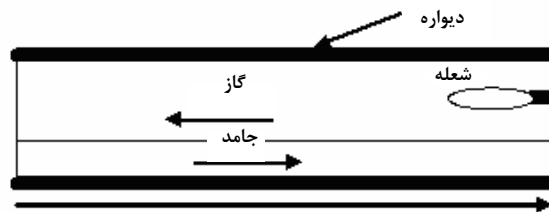
موازنه جرم برای ترکیب ۹ جامد که در واکنشها شرکت می کنند، نوشته شده و برای دو گاز CO_2 ، H_2O و نیز سوخت، به صورت زیر می باشد:

$$V_s \frac{\partial C_i}{\partial z} = R_i \quad (2)$$

$$V_g \frac{\partial C_j}{\partial z} = R_j \quad (3)$$

$$V_F \frac{\partial C_F}{\partial z} = R_F \quad (4)$$

واکنش هایی دارد که در این دو فاز اتفاق می افتند. برای اینکه بتوان این رفتار پیچیده را شبیه سازی کرد و تاثیرات پارامترها را مورد بررسی قرار داد از فرضیات ساده کننده ای استفاده شده است. نمای ساده ای از یک کوره دوآر سیمان در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نمای ساده ای از یک کوره دوآر سیمان [۱۲]

۲-۱ فرضیات مدل

در مدل حاضر، سعی بر آن بوده که ساختار مدل از حداکثر سادگی برخوردار باشد. فرضیات به کار گرفته شده به صورت زیر می باشند:

- قطر داخلی و خارجی کوره ثابت می باشند.
- گرمای ویژه واکنشها مستقل از دما، و در جهت محوری (طول کوره)، ثابت است.
- هدایت در گازها و نیز مواد جامد، در جهت طول دیواره قابل اغماض است.
- سرعت و ارتفاع مواد جامد، ثابت می باشند.
- متغیرهای شعاعی و زاویه ای در دمای دیواره قابل اغماض می باشند.

جدول ۱- واکنش های انجام شده در کوره [۸]

دما (K)	واکنش	تبادل گرما
۳۷۳	تبخیر آب آزاد	گرماگیر
بالای ۱۱۶۰	آزاد شدن دی اکسید کربن از کربنات کلسیم $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	گرماگیر
۱۴۸۰	شروع ترکیب آهک و سیلیس $2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{S}$	گرمازا
۱۵۳۰	تشکیل مایع $4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{C}_4\text{AF}$ $3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{C}_3\text{A}$	گرماگیر گرماگیر
بالای ۱۵۳۰	تکمیل ترکیبات سیمان $2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{S}$ $\text{C}_2\text{S} + \text{CaO} \rightarrow \text{C}_3\text{S}$	گرمازا گرما گیر

$$R_{Fe_2O_3} = -\frac{M_{Fe_2O_3}}{4.M_{CaO}}.K_{C_4AF}.C_{CaO}^4.C_{Al_2O_3}.C_{Fe_2O_3} \quad (14)$$

$$K_i = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{rT_s}\right) \quad (15)$$

avec $i = CaO, C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF$

$$R_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}}.K_{CaO}.C_{CaO}.(-v_g) + y_{CO_2}.R_F \quad (16)$$

$$R_{O_2} = -y_{O_2}.R_F \quad (17)$$

$$R_{H_2O(vap)} = R_{H_2O}.(-v_g) + y_{H_2O}.R_F \quad (18)$$

برخلاف مدل اسپننگ، انتقال جرم H_2O ، CO_2 ، بین جامدات و گازها منظور شده است. علت آن است که درصد O_2 در فاز گاز، معمولاً برای کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرد و باید به طور صحیح اندازه‌گیری شود. نتایج غلظت‌های CO_2 ، H_2O و O_2 حاصل از واکنش سوخت در این مدل لحاظ شده است [۱۲ و ۱۳]. موازنه انرژی برای جامد، گاز، دیواره و دماهای مربوطه از معادلات زیر به دست می‌آید:

$$A_s C_{P_s} \rho_s V_s \frac{\partial T_s}{\partial Z} = \beta_2 (T_g - T_s) \quad (19)$$

$$+ \beta_3 (T_w - T_s) - C_{P_s} \rho_s A_s \frac{\partial T_s}{\partial t} + A_s q_c$$

$$A_g C_{P_g} \rho_g V_g \frac{\partial T_g}{\partial Z} = \beta_1 (T_w - T_g) + \beta_2 (T_s - T_g) + q_f \quad (20)$$

$$A_w C_{P_w} \rho_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \beta_1 (T_g - T_w) \quad (21)$$

$$+ \beta_3 (T_s - T_w) + \beta_4 (T_a - T_w)$$

این معادلات نشان می‌دهند که انتقال گرما از طریق جابجایی، تابش و رسانش در طول دیواره اتفاق می‌افتد. همچنین انتقال گرما از طریق جابجایی و تابش متناسب با ΔT^4 و ΔT است. ضرایب کلی

در این روابط i و j ترکیبات زیر می‌باشند:

$$i = CaO, C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF, CaCO_3, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3$$

$$j = H_2O(vap), CO_2$$

سرعت‌های تولیدی به صورت‌های زیر می‌باشند:

$$R_{H_2O} = \begin{cases} -K_{H_2O} \cdot X_{H_2O} & X_{H_2O} \leq 0.1 \\ -K_{H_2O} & X_{H_2O} > 0.1 \end{cases} \quad (5)$$

$$R_{CaCO_3} = -\frac{M_{CaCO_3}}{M_{CaO}}.K_{CaO}.C_{CaO} \quad (6)$$

$$R_{C_3S} = \frac{M_{C_3S}}{M_{CaO}}.K_{C_3S}.C_{CaO}.C_{C_2S} \quad (7)$$

$$R_{C_2S} = \frac{M_{C_2S}}{2.M_{CaO}}.K_{C_2S}.C_{CaO}^2.C_{SiO_2} - \frac{M_{C_2S}}{M_{CaO}}.K_{C_3S}.C_{CaO}.C_{C_2S} \quad (8)$$

$$R_{C_3A} = \frac{M_{C_3A}}{3.M_{CaO}}.K_{C_3A}.C_{CaO}^3.C_{Al_2O_3} \quad (9)$$

$$R_{C_4AF} = \frac{M_{C_4AF}}{4.M_{CaO}}.K_{C_4AF}.C_{CaO}^4.C_{Al_2O_3}.C_{Fe_2O_3} \quad (10)$$

$$R_{CaO} = K_{CaO}.C_{CaCO_3} - K_{C_3S}.C_{CaO}.C_{SiO_2} - K_{C_2S}.C_{CaO}^2.C_{SiO_2} - K_{C_3A}.C_{CaO}^3.C_{Al_2O_3} - K_{C_4AF}.C_{CaO}^4.C_{Al_2O_3}.C_{Fe_2O_3} \quad (11)$$

$$R_{Al_2O_3} = -\frac{M_{Al_2O_3}}{4.M_{CaO}}.K_{C_4AF}.C_{CaO}^4.C_{Al_2O_3}.C_{Fe_2O_3} - \frac{M_{Al_2O_3}}{3.M_{CaO}}.K_{C_3A}.C_{CaO}^3.C_{Al_2O_3} \quad (12)$$

$$R_{SiO_2} = -\frac{M_{SiO_2}}{2.M_{CaO}}.K_{C_2S}.C_{CaO}^2.C_{SiO_2} \quad (13)$$

نواحی مختلف، سرعت سیال و نیز محاسبه سرعت واکنش‌ها بر اساس معادلات ارائه شده در قسمت قبل می‌باشیم. همچنین محاسبات مربوط به گرمای واکنش‌ها در سه بستر جامد، گاز و دیواره، مورد نیاز می‌باشد. بنابراین همه این معادلات به صورت همزمان حل شده و با تغییر طول، پارامترها نیز متناسب با آن تغییر می‌کنند.

برای انجام شبیه‌سازی، معادلات مربوط به محاسبه پارامترها که معادلات جبری هستند به صورت همزمان با معادلات دیفرانسیل انتقال جرم و گرما حل می‌شوند. معادلات دیفرانسیل معمولی حاکم بر کوره دوار سیمان، که در آنها شیب تغییرات نسبت به مکان در نقاطی خاص بسیار تند و یا کند است جزء مسائل دشوار می‌باشند. بنابراین تعریف ΔZ متغیر، که مقدار آن بسته به شیب تغییرات در طول کوره تغییر کند، ضروری است [۱۶].

اولین گام برای شبیه‌سازی کوره دوار سیمان وارد کردن پارامترهای طراحی کوره، اعم از ابعاد و فیزیک مساله است. مرحله دوم، وارد کردن مشخصات جریان‌های ورودی شامل شدت جریان، دما و ترکیبات دو فاز جامد و گاز، شدت جریان سوخت، مشخصات سوخت و سایر ثابت‌های خواهد بود. مرحله بعدی، استفاده از الگوریتم روزنبرک تغییر یافته برای حل همزمان معادلات انتقال جرم و گرماس. بنابراین با جلو رفتن یک ΔZ در طول کوره، ابتدا باید سرعت‌های واکنش‌ها بر اساس رابطه آرنیوس نسبت به دما محاسبه شوند. ابتدا گرمای واکنش‌ها محاسبه می‌شوند. چنانچه در ناحیه شعله باشیم، معادلات انتقال گرما با در نظر گرفتن مقدار شعله، و گرنه بدون شعله، حل می‌شوند. به این ترتیب، دماهای جدید به دست می‌آیند و با انجام مراحل فوق، معادلات، حل، و شبیه‌سازی انجام می‌شود.

۴- بررسی حساسیت مدل به پارامترها

در این بخش، سعی شده است که اثر تغییر پارامترهای کوره بر سیمان تولیدی بررسی گردد. پارامترهای مورد بررسی شامل سرعت جامد و گاز، زاویه پرشدگی و شعاع کوره می‌باشند. با بررسی اثر تغییر این پارامترها، روند عملیاتی کوره در حالت‌های مختلف بررسی شده و نقاط بهینه به دست می‌آیند. با انتخاب پارامترهایی که تاثیر بیشتری بر روند کاری کوره دارند محدوده این پارامترها به گونه‌ای تعیین می‌شود تا واکنش‌های لازم در کوره انجام شوند و به تولید

انتقال گرمای β_i تابع ناخطی دمای انتقال گرمای جابجایی، تابش و هندسه کوره می‌باشند. این ضرایب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\beta_1 = r_1 p [F_1 + 1.1 \times 10^{-4} (1 - h_0) \varepsilon_g \varepsilon_w (T_g^2 + T_w^2) (T_g + T_w)]$$

$$\beta_2 = 2r_1 \sin\left(\frac{P}{2}\right) [F_2 + 1.1 \times 10^{-4} \varepsilon_g \varepsilon_s (T_g^2 + T_s^2) (T_g + T_s)]$$

$$\beta_3 = r_1 (2\pi - p) [F_3 + 1.1 \times 10^{-4} h \varepsilon_w \varepsilon_s (T_w^2 + T_s^2) (T_w + T_s)]$$

$$\beta_4 = 2\pi r_2 F_4$$

$$A_s = \frac{R_1^2}{2} (2\pi - P + \sin P)$$

$$A_g = \frac{R_1^2}{2} (P - \sin P)$$

$$A_w = 2\pi (r_2^2 - r_1^2)$$

$$h = 1 + \frac{2h_0 \sin\left(\frac{P}{2}\right)}{2\pi - p}$$

گرمای تولید شده توسط شعله برابر است با [۱۲ و ۱۳]:

$$q_f = (-\Delta H_F) A_g M_c R = \frac{G_F (-\Delta H_F)}{\rho_g v_g} \left[\frac{\psi M_{C_1} (M_a P)^2}{\rho_F M_{O_2} (RT_g)^2} \right] K_F d_0 C_F$$

۳- آگوریتم شبیه‌سازی

با توجه به مدل ارائه شده به منظور استفاده در بهینه‌سازی، معادلات حاکم بر کوره دوار سیمان به صورت دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی ناخطی (ODE) به دست می‌آید [۱۵]. جهت انجام شبیه‌سازی، آگوریتمی تهیه گردید که توسط آن شبیه‌سازی حالت یکنواخت مساله مورد نظر، صورت پذیرفت. در نهایت، اثر تغییر پارامترهای مختلف از قبیل سرعت جامد و گاز، زاویه پرشدگی و شعاع کوره بر روی غلظت اجزاء و دمای سه فاز گاز، دیواره و جامد مورد مطالعه قرار گرفت. دسته معادلات حاصله باید به صورت همزمان حل شوند. این معادلات، شامل معادلات مربوط به تغییرات غلظت، دماهای سه فاز جامد، گاز و دیواره در طول کوره می‌باشند. برای حل معادلات، ناگزیر به محاسبه پارامترها اعم از مساحت

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش سرعت جامد، دمای گاز ورودی افزایش می‌یابد. اختلاف دما در ناحیه انتهایی کوره بیشتر است. هر چه به سمت ورودی کوره پیش می‌رویم با مصرف آنتالپی گاز در واکنش‌های مختلف، اختلاف نمودارها کاهش یافته و به صفر می‌رسد.

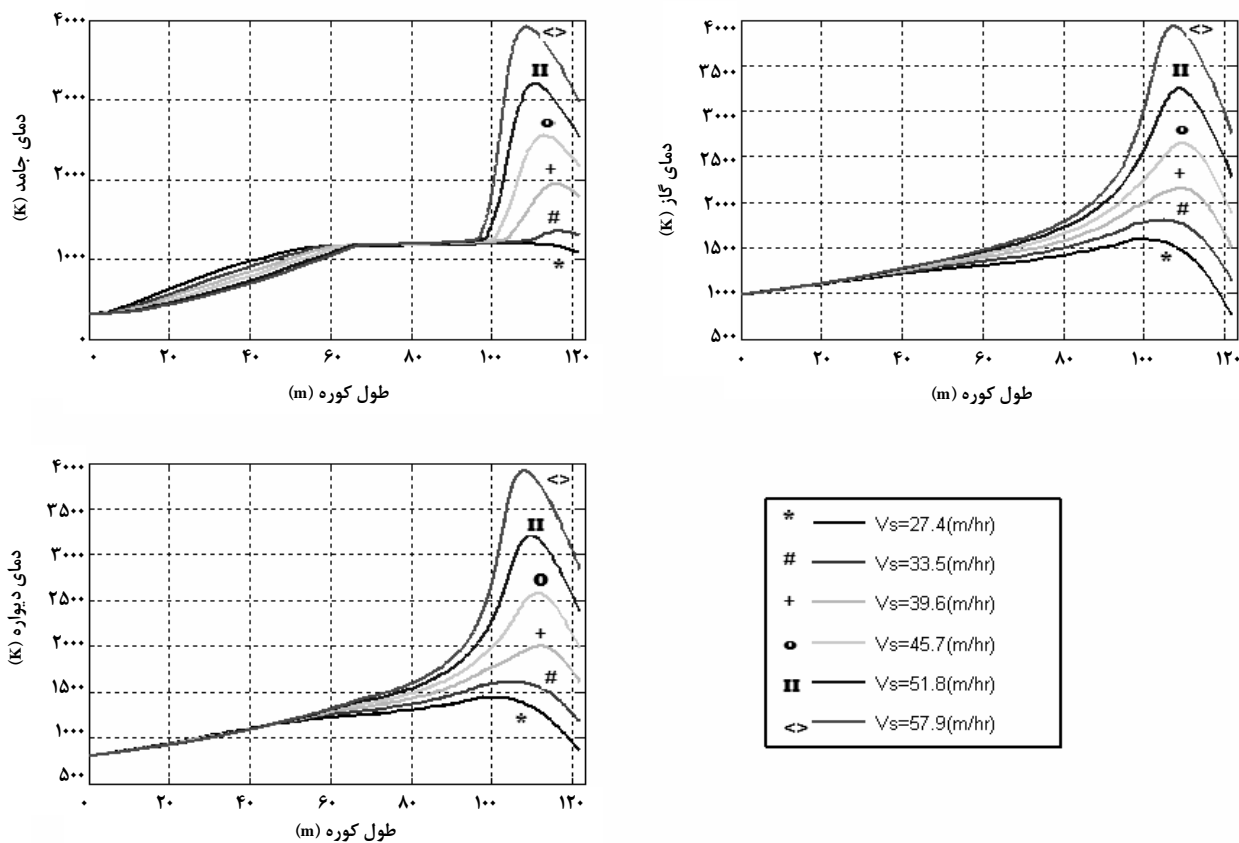
۴-۲ اثر تغییر سرعت گاز

شکل (۳) اثر سرعت گاز بر دمای جامد، گاز و دیواره در طول کوره را نشان می‌دهد. سرعت گاز از $10668(m/hr)$ تا $16764(m/hr)$ در پنج مرحله تغییر داده شد. دمای هوای خروجی از کوره، سرعت جامد، زاویه پرشدگی و شعاع کوره، ثابت، و دمای گاز ورودی، متغیر است.

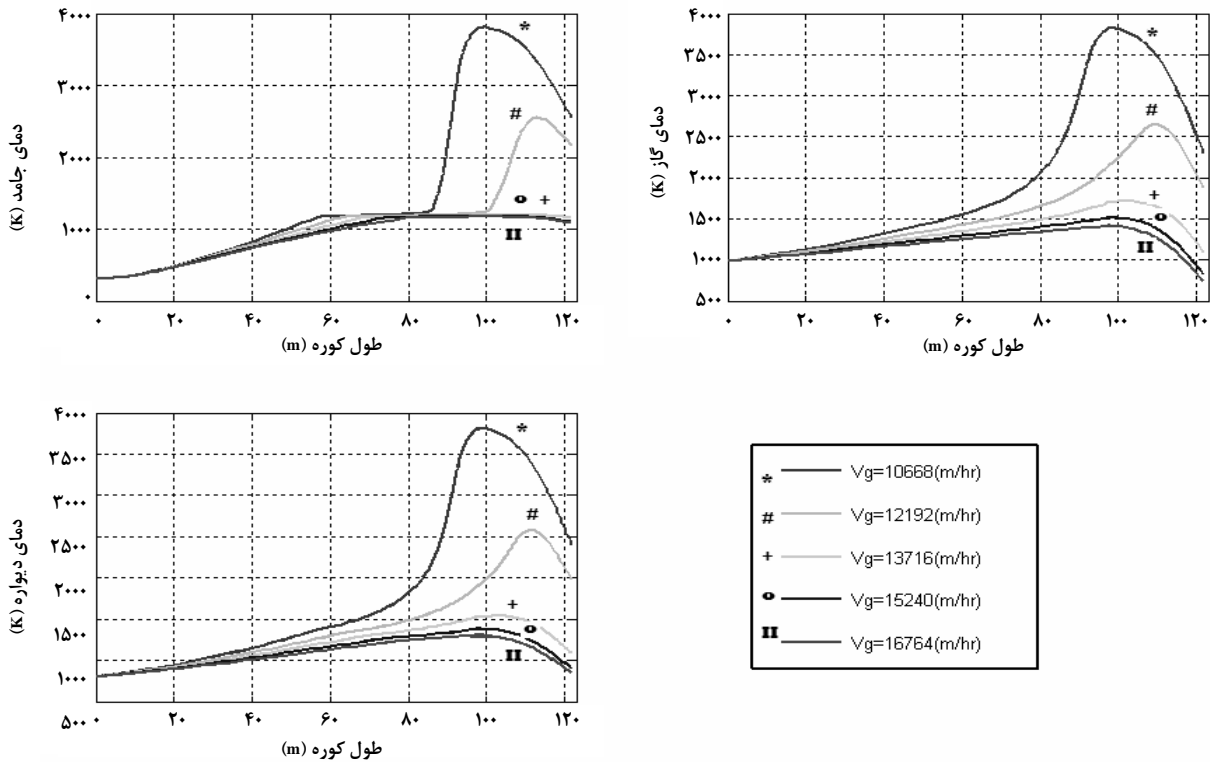
حداکثر سیمان منتهی گردد. با تغییر تنها یک پارامتر خاص، کوره در حالت عملیاتی بهینه قرار نمی‌گیرد و متغیرهای دیگر نیز به تناسب آن می‌بایست تغییر کنند تا عملکرد کوره مورد ارزیابی قرار گیرد.

۴-۱ اثر تغییر سرعت جامد

سرعت جامد از $27/4(m/hr)$ تا $57/9(m/hr)$ در شش مرحله تغییر داده شد. با افزایش سرعت جامد، گرمای بیشتری برای انجام واکنش‌ها مورد نیاز است. دمای گاز خروجی از کوره برابر با مقدار حالت یکنواخت در نظر گرفته شد. بنابراین دمای گاز ورودی باید افزایش یابد تا مقدار انرژی لازم برای واکنش فاز جامد تامین شود. اثر تغییر سرعت جامد بر روی دمای سه فاز جامد، گاز و دیواره در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- اثر سرعت جامد بر دمای جامد، گاز و دیواره در طول کوره



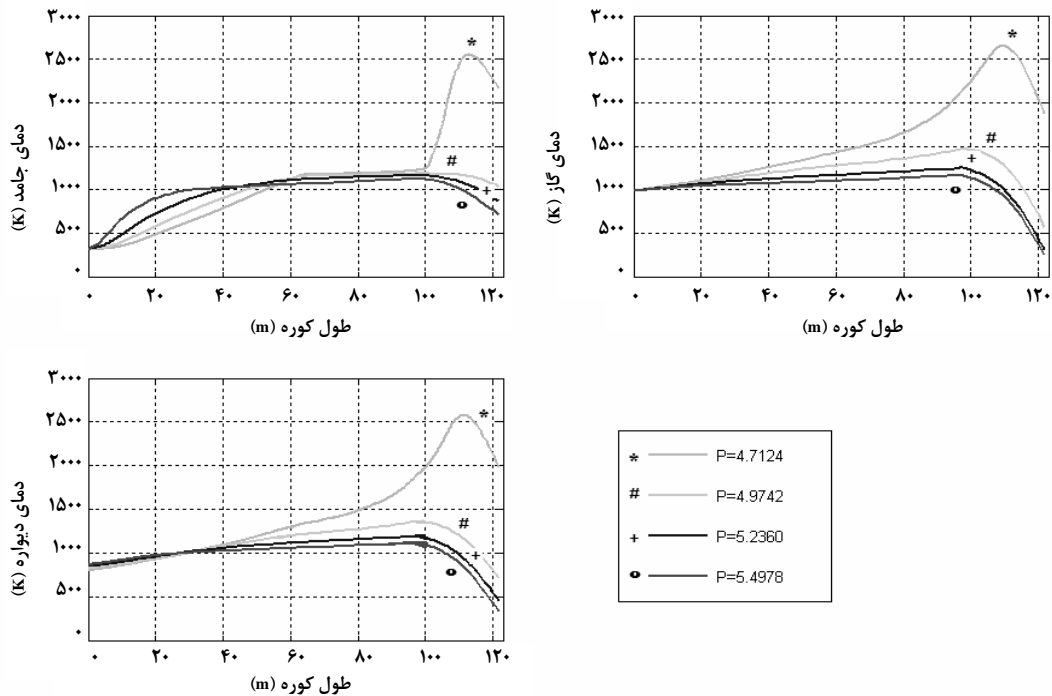
شکل ۳- اثر سرعت گاز بر دمای جامد، گاز و دیواره در طول کوره

اثر این پارامتر با فرض متغیر بودن دمای گاز ورودی و ثابت بودن دیگر پارامترها بررسی شده است. زاویهٔ پرشدگی از $4\pi/3$ ($4/7^\circ$) تا $11\pi/6$ ($5/5^\circ$) در چهار مرحله تغییر کرده است. با افزایش زاویهٔ پرشدگی، سطح جامد و به تبع آن، شدت جریان جامد، کاهش می‌یابد و همچنین، سطح تبادل گرما کم می‌شود. کم شدن شدت جریان جامد، کاهش آنتالپی مورد نیاز را در پی داشته و در نتیجه دمای هوای ورودی کوره کاهش می‌یابد. با افزایش زاویهٔ پرشدگی در نمودار دمای فاز جامد، شدت جریان جامد کاهش می‌یابد و دمای جامد به سرعت به دمای گاز می‌رسد. این روند در طول کوره ادامه می‌یابد ولی در زاویه‌های کم که در آن، شدت جریان، زیاد است این فاصله، افزایش نشان می‌دهد. در زاویه‌های زیاد انباشتگی، به دلیل کم بودن جامد، مقدار آنتالپی منتقل شده از گاز به جامد کم است و بنابراین دمای گاز، افت کمتری خواهد داشت.

مقدار آنتالپی ورودی به مقدار دمای گاز ورودی و نیز شدت جریان آن وابسته است. با افزایش شدت جریان گاز و دمای هوای ورودی، آنتالپی کاهش می‌یابد (نمودار دمای گاز). در شدت جریان کم گاز، به دلیل ثابت بودن شدت جریان سوخت، دمای گاز و به تبع آن دمای دو فاز جامد و دیواره در ناحیه شعله بالاتر می‌رود. بنابراین در شدت جریان کم گاز، ماکزیمم‌های بزرگتری را نسبت به شدت جریان زیاد گاز شاهد هستیم.

۳-۴ اثر تغییر زاویه پرشدگی

زاویهٔ پرشدگی بیانگر زاویه بالای سطح جامد است که توسط آن سطح جامد (A_s) و سطح گاز عبوری (A_g) محاسبه می‌شوند. بررسی اثر تغییر زاویهٔ پرشدگی در واقع اثر سطح جامد را نشان می‌دهد که به تبع آن مساحت‌های انتقال گرمای تابشی و جابجایی، ضرایب شکل و شدت جریان جامد تغییر می‌کند. در نمودارهای زیر،

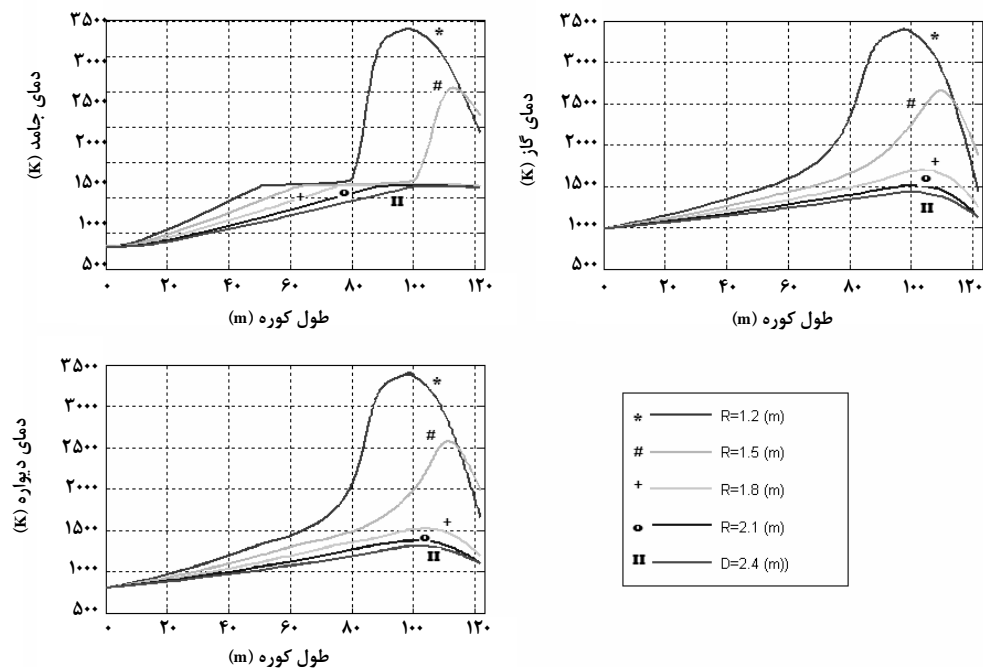


شکل ۴- اثر تغییر زاویه پرتشدگی بر دمای جامد، گاز و دیواره در طول کوره

۴-۴ اثر تغییر شعاع کوره

شدت جریان جامد و گاز را به طور همزمان تغییر دهد. با تغییر دمای هوای ورودی و ثابت ماندن دمای هوای خروجی، اثر این پدیده بررسی شد. شعاع داخلی کوره از $m \ 1/2$ تا $m \ 2/4$ در پنج مرحله تغییر کرده است.

در این بخش اثر تغییر شعاع داخلی کوره با فرض ثابت بودن ضخامت دیواره مورد بررسی قرار گرفته است. با ثابت بودن زاویه پرتشدگی، سرعت گاز و جامد، تغییر شعاع کوره می‌تواند سطح و



شکل ۵- اثر تغییر شعاع کوره بر دمای جامد، گاز و دیواره در طول کوره

۵- آلوگوریتم بهینه‌سازی

ابتدا پارامترهای موثر در بهینه‌سازی کوره دوار برای یک نوع خاص از سیمان انتخاب شده و محدوده تغییرات آن‌ها با توجه به بررسی‌های بخش قبل، تعیین می‌گردد. مرحله بعد تشکیل جمعیت اولیه است که شامل دسته پارامترهایی است که به سیستم دو دویی تبدیل می‌شوند. برای این کار، دو روش وجود دارد. یکی حدس‌های هوشمندانه توسط کاربر و دیگری حدس‌هایی غیرهوشمندانه که توسط رایانه به صورت حدس و خطای داخل محدوده مشخص شده انجام می‌گیرد.

پارامترهای حدس زده شده توسط آلوگوریتم، به مبنای دو دویی تبدیل می‌شوند. هر دسته از پارامترها در مبنای دو، پشت سر هم قرار گرفته و تشکیل یک کروموزوم می‌دهد. در واقع هر کدام از صفر و یک‌های ماتریس جمعیت اولیه، ژن‌های کروموزوم‌ها محسوب می‌شوند. مرحله بعدی، محاسبه مقدار تابع هدف بر اساس آلوگوریتم شبیه‌سازی ارائه شده در بخش قبل است.

• تابع هدف

در این تحقیق، تابع هدف، مقدار شدت جریان جرمی سیمان تولیدی است که باید در شرایط استانداردهای سیمان مورد نظر صدق کند.

$$M = V_s * A_s * \rho_s \quad (23)$$

پارامترهای بهینه‌سازی شامل سرعت‌های جامد و گاز ورودی، دمای فاز گاز، شعاع کوره، زاویه پرشدگی، مقدار اکسید آلومینیم و اکسید آهن، بر کیفیت سیمان تاثیر گذار هستند. در آلوگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده، تابع شبیه‌ساز با استفاده از پارامترهایی که از طریق کدهای ژنتیکی دریافت می‌کند، شبیه‌سازی کوره دوار را انجام، و پروفایل‌های غلظت و دما را در طول کوره به دست می‌دهد. نتایج حاصله می‌بایست با شرایط استانداردهای سیمان مطابقت داده شود. برنامه شبیه‌ساز طوری طراحی شده است که اگر کیفیت سیمان تولیدی در شرایط سیمان هدف صدق کند، مقدار شدت جریان جرمی سیمان تولیدی حفظ می‌شود و در غیر این صورت، برای تابع هدف، مقدار صفر منظور می‌گردد. با استفاده از مقدار تابع هدف به

دست آمده برای هر دسته از پارامترها، این پارامترها ارزش‌گذاری شده‌اند که به این کار، اصطلاحاً محاسبه تابع برازندگی گویند.

مرحله بعد تشکیل جمعیت ثانویه یا در واقع سلسله حدس‌های جدید برای پارامترهای تابع هدف است. بعد از مرتب کردن مقادیر تابع هدف برای پارامترهای حدس زده شده در مرحله قبل، بهترین پارامترها مستقیماً به جمعیت بعدی انتقال می‌یابند (بهترین پارامترها، پارامترهایی هستند که مقدار تابع برازندگی تابع هدف آنها ماکزیمم باشد). جمعیت جدید بر اساس اجرای عملگرهای انتخابی، ترکیبی و جهشی بر روی جمعیت قبلی به دست می‌آید. یک بخش از پارامترها، پارامترهای بهینه مرحله قبل می‌باشند که مستقیماً به مرحله بعدی انتقال می‌یابند. بخش دوم دسته پارامترهایی هستند که بر اساس عملگر انتخاب، وارد مرحله بعدی می‌شوند. مکانیسم انتخاب در این آلوگوریتم، استفاده از چرخه رولت و تابع چگالی احتمال می‌باشد. بخش سوم، دسته پارامترهایی هستند که به مرحله بعد راه می‌یابند، این دسته پارامترها از ترکیب دسته پارامترهای مرحله قبل حاصل می‌شوند. دسته پارامترهایی که دارای تابع برازندگی بزرگتری می‌باشند با احتمال بیشتری در بخش ترکیب مورد استفاده قرار می‌گیرند. مکانیسم استفاده شده برای عملگر ترکیب در این برنامه، ترکیب سه نقطه‌ای است.

عملگر بعدی، عملگر جهش است که به صورت کاملاً تصادفی بر روی کروموزوم دسته پارامترها عمل می‌کند و با صفر و یک نمودن ژن مربوطه مقادیر پارامترها را تغییر می‌دهد. این عملگر به جستجوی مناطقی از فضای بهینه‌سازی می‌پردازد که جستجوگر در آن مناطق، غیر فعال است. در واقع این عملگر برای اجتناب از به دام افتادن در اکستریم‌های محلی طراحی شده است.

فرایند جستجو تا رسیدن به یک مقدار ماکزیمم مطلوب و پایا ادامه می‌یابد. با عدم تغییر در مقدار ماکزیمم بدست آمده اجرای برنامه متوقف می‌گردد.

۵-۱ محدودیت‌ها

انواع سیمان‌های مورد استفاده در صنایع مختلف دارای استانداردها و ویژگی‌های خاصی می‌باشند که در این تحقیق، استانداردهای ارائه شده توسط موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران مبنای بهینه‌سازی قرار گرفته است. انواع سیمان‌های مطالعه شده در این تحقیق عبارتند از:

الف- سیمان پرتلند نوع دو (پ - ۲)

به عنوان سیمان پرتلند اصلاح شده، مصرف ویژه آن در ساخت بتن‌هایی است که گرمای هیدراتاسیون (آبپوشی) متوسط برای آن‌ها ضرورت داشته و حمله سولفات‌ها در حد متوسط باشد.

۶- نتایج حاصل از بهینه‌سازی

مشخصات پارامترهای بهینه شده شامل حدود بالا و پایین پارامترها، مقدار بهینه شده آن‌ها و نیز مقدار تابع هدف در حالت بهینه برای سیمان‌های تیپ‌های ۲، ۳ و ۴ در جدول‌های (۳)، (۴) و (۵) نشان داده شده است.

ب- سیمان پرتلند نوع سه (پ - ۳)

به عنوان سیمان پرتلند با مقاومت اولیه زیاد بکار می‌رود.

پ- سیمان پرتلند نوع چهار (پ - ۴)

به عنوان سیمان پرتلند در شرایطی که حرارت آبپوشی کم بتن مورد

جدول ۲- ویژگی‌های الزامی شیمیایی سیمان پرتلند [۱۹]

نوع سیمان پرتلند					ویژگی‌های شیمیایی
۵	۴	۳	۲	۱	
-	-	-	۲۰/۰۰	-	SiO ₂ درصد اکسید سیلیسیم (حداقل)
-	-	-	۶/۰۰	-	Al ₂ O ₃ درصد اکسید آلومینیم (حداکثر)
-	۶/۵۰	-	۶/۰۰	-	Fe ₂ O ₃ درصد اکسید آهن (حداکثر)
۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	MgO درصد اکسید منیزیم (حداکثر)
۲/۳۰	۲/۳۰	۳/۵۰	۳/۰۰	۳/۰۰	SO ₃ درصد تری اکسید گوگرد (حداکثر)
۲/۰۰	۲/۵۰	۳/۰۰	۳/۰۰	۲/۰۰	درصد کسر وزن در اثر سرخ شدن (حداکثر)
۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۲۵	درصد باقیمانده نامحلول (حداکثر)
-	۳۵/۰۰	-	-	-	C ₃ Si درصد سه کلسیم سیلیکات (حداکثر)
-	۲۰/۰۰	-	-	-	C ₂ Si درصد دو کلسیم سیلیکات (حداقل)
۵/۰۰	۷/۰۰	۱۵	۸/۰۰	-	C ₃ Al درصد سه کلسیم آلومینات (حداکثر)
۲۵	-	-	-	-	درصد مجموع چهار کلسیم آلومینوفریت و دو برابر سه کلسیم آلومینات 2C ₃ Al + C ₄ AF (حداکثر)

جدول ۳- مشخصات پارامترهای بهینه برای سیمان تیپ ۲

V _s	P	V _g	R (m)	C _{Fe₂O₃}	C _{Al₂O₃}	C _{SiO₂}	T _g (K)	پارامتر
۵۸	۵	۱۵۲۰۰	۲/۱۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۲	۹۹۴	حد بالای پارامترها
۳۷	۳/۵	۹۱۴۰	۱/۲۲	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۵	۱	۹۵۰	حد پایین پارامترها
۵۴/۷	۴/۵۹	۱۲۹۰۰	۲/۱	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۹۸	۱/۵	۹۹۲	مقدار بهینه شده
۷۶۱۸۰/۱۸۳۹ (kg/hr)								مقدار تابع هدف
								بهینه

جدول ۴- مشخصات پارامترهای بهینه برای سیمان تیپ ۳

پارامتر	$T_g (K)$	$C_{Al_2O_3}$	$C_{Fe_2O_3}$	$R (m)$	V_g	P	V_s
حد بالای پارامترها	۱۰۳۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۲/۱۳	۱۵۲۰۰	۵	۵۸
حد پایین پارامترها	۹۹۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۱/۲۲	۹۱۴۰	۳/۵	۳۷
مقدار بهینه شده	۹۹۸	۰/۱۰۷۹	۰/۰۵۱۶	۱/۵۸	۱۱۴۰۰	۴/۸۷	۵۰/۴
مقدار تابع هدف بهینه	۲۶۲۱۴/۱۲۱ (kg/hr)						

جدول ۵- مشخصات پارامترهای بهینه برای سیمان تیپ ۴

پارامتر	$T_g (K)$	$C_{Al_2O_3}$	$C_{Fe_2O_3}$	$R (m)$	V_g	P	V_s
حد بالای پارامترها	۱۰۰۰	۰/۱۵	۰/۰۷	۲/۱۳	۱۵۲۰۰	۵	۵۵
حد پایین پارامترها	۹۹۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲۵	۱/۲۲	۹۱۴۰	۳/۵	۳۷
مقدار بهینه شده	۹۵۸	۰/۰۴۶۹	۰/۰۲۲	۱/۶	۱۲۲۰۰	۴/۷۰	۴۷/۲
مقدار تابع هدف بهینه	۳۱۳۲۷/۳۵۷ (kg/hr)						

با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده در بالا پارامترهای کوره دوار و مقدار سیمان تولیدی، برای انواع سیمان‌های مورد نظر بهینه شده و نتایج آن در جدول (۶) آمده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند پارامترهایی که برای تیپ‌های مختلف سیمان بدست آمده‌اند بر اساس محدودیت‌های ذکر شده در جدول (۲) متفاوت می‌باشند. این پارامترها مستقیماً بر کیفیت و مقدار سیمان تولیدی اثرگذار هستند.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، سعی شده است تا یک کوره سیمان برای حالت‌های مختلف با هدف ماکزیم میزان تولید بهینه گردد. برای این کار از مدل یکنواخت کوره دوار سیمان استفاده شد. این مدل بر اساس

معادلات تصحیح شده مدل اسپنگ استوار است. با شبیه‌سازی کوره به منظور تولید سیمان‌های خاص که در این تحقیق، سیمان‌های پرتلند تیپ ۲، ۳ و ۴ می‌باشند، ابتدا آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر، انجام شد و محدوده تغییرات آنها مشخص گردید. سپس با ارائه یک الگوریتم بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در تولید، بهینه شد. با استفاده از الگوریتم ژنتیکی و اعمال محدودیت‌های مورد نظر، بهینه‌سازی بر پایه یک جستجوی هوشمندانه انجام گردید.

پارامترهای بهینه عملیاتی و طراحی کوره برای سیمان‌های یاد شده در جدول‌های مربوطه ارائه شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند این پارامترها برای تیپ‌های مختلف سیمان بر اساس محدودیت‌های ذکر شده در جدول (۲) متفاوت بوده و مستقیماً بر کیفیت و مقدار سیمان تولیدی مؤثر می‌باشند.

جدول ۶- مشخصات پارامترهای بهینه برای سیمان پرتلند تیپ‌های ۲، ۳، ۴ و مدل اسپنگ

تیپ ۲	تیپ ۳	تیپ ۴	مدل اسپنگ	نوع سیمان / پارامتر
۵۴/۷	۵۰/۴	۴۷/۲	۴۵/۷	$V_s (m/hr)$
۴/۵۹	۴/۸۷	۴/۷۰	۴/۷۱	$P_R (rad)$
۱۲۹۰۰	۱۱۴۰۰	۱۲۲۰۰	۱۲۲۰۰	$V_g (m/hr)$
۲/۱	۱/۵۸	۱/۶	۱/۵۲	$R (m)$
۰/۰۱۱۵	۰/۰۵۱۶	۰/۰۲۲	۰/۰۴۶۹	$C_{Fe_2O_3}$
۰/۰۱۹۸	۰/۱۰۷۹	۰/۰۴۶۹	۰/۰۹۳۸	$C_{Al_2O_3}$
۱/۵	۰/۳۳۹۸	۰/۳۳۹۸	۰/۳۳۹۸	C_{SiO_2}
۹۹۲	۹۹۸	۹۵۸	۹۴۴	$T_g (K)$
۷۶۱۸۰/۸۳۹	۲۶۲۱۴/۱۲۱	۳۱۳۲۷/۳۵۷	۲۷۱۸۵/۶۰۵	مقدار تابع هدف بهینه (kg/hr)

Goussis, V. N. Burganos and A. C. Payatakes, "CFD Predictions for Cement Kilns Including Flame Modeling", Heat Transfer and Clinker Chemistry, Applied Mathematical Modeling, Vol. 23, pp. 55-76, (1999).

[12] A. C. Witsel, C. Renotte and M. Remy, "New Dynamic Model of Rotary Cement Kiln", Vol. 23, pp. 55-76, (2004).

[13] H. C. Steward and R. Canon, "The calculation of radiative heat flux in a cylindrical furnace using the Monte Carlo Method" Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 8, pp. 1153-1169, (1965).

[14] M. Tokyay, "Effect of Chemical Composition of Clinker on Grinding Energy Requirement", Cement and Concrete Research Press, Vol. 29, pp. 531-535, (1999).

[15] S. L. Cheng and C. Hwang, "Optimal Approximation of Linear System by Differential Evolution Algorithm", IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics- Part A: System and Humans, Vol. 31, No. 6, pp. 698-707, (2001).

[16] L. F. Shampine and M. W. Reichelt, "The MATLAB ODE Suite," SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 18, pp. 1-22, (1997).

[17] Giridhar K., Progress in Cement and Concretes., "Optimization of Vertical Roller Mills", Vol. 12, pp. 86-97 Published by ABI Books Private Limited, (1996).

[18] M. Azarmi, "Simulation and Optimization of Disturbing Process at Refinery", MSc. Thesis, Chemical Eng. Dept. Iran Uni. of Sci. and Tech., (2007).

[۱۹] سایت تخصصی سیمان ایران، www.Irancement.com، مجله

سیمان، استاندارد سیمان ایران، تیر ماه (۱۳۸۰).

مراجع

[۱] حسین شفیع و مصطفی خانزادی، "کوره‌های دوار"، دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ اول، صفحه ۳۵، (۱۳۸۵).

[2] J. P. Holman, "Heat Transfer ", Vol. 2, pp. 173, McGraw-Hill (1963).

[3] V. Frish and R. Jeschar, "Possibilities for Optimizing the Burning Process in Rotary Cement Kiln", Z. K. G., No.10/83, pp. 549-560, (1983).

[4] J. K. Brimacombe and A. P. Watkinson, "Heat Transfer in a Direct-Fired Rotary Kiln (I)", Metallurgical Transaction B, Vol. 9B, pp. 201-208, (1978).

[5] J. K. Brimacombe and A. P. Watkinson, "Heat Transfer Model for the Rotary Kiln (II)", Metallurgical Transaction B, Vol. 20B, pp. 403-419, (1989).

[6] S. Saelid, "Modeling, Estimation and Control of Rotary Cement Kiln", Ph.D. Thesis, Dept. of Chem. Eng., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, U.S.A. (1976).

[7] M. Metzger, "Simplified Mathematical Model of the Rotary Kiln Unit Dynamic Properties", Z. K. G., No. 11, pp. 559-564, (1982).

[8] H. A. Spang, "A Dynamic Model of Cement Kiln", Automatica, Vol. 8, pp. 309-323, 1972.

[9] B. P. Graham, P. L. Lee and R. B. Newell, "Simulation of multivariable control of cement kiln", Chem. Eng. Res. Des., Vol. 63, pp. 363-365, (1985).

[10] G.N. Charos, Y. Arkun and R.A. Taylor, "Model Predictive Control of Industrial Lime Kiln", Tappi Journal, pp. 203-211, (1991).

[11] E. Mastorakos, A. Massias, C. D. Tsakiroglou, D. A.