

## نگهداشت انرژی با استفاده از مدلسازی کوره دوار سیمان

فریبا کردارپور<sup>۱</sup>، حمید رضا گشایشی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۴/۱۲/۱۹

تاریخ دریافت مقاله:

۹۴/۷/۱۰

### چکیده:

تولید سیمان یک فرایند بشدت انرژی بر می‌باشد و کوره دوار مهم‌ترین بخش فرایند است. کوره دوار به عنوان یک راکتور و با توجه به ماهیت پیچیده واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی در آن و نیز پارامترهای متعدد موثر بر کیفیت، معادلات دینامیکی پیچیده‌ای دارد که درک آنها نیاز به شناخت دقیق پدیده‌های انتقال دارد. عملکرد بهینه کوره امکان نگهداشت بخشی از انرژی حرارتی را که به طور عادی در فرایند تلف می‌گردد، فراهم می‌سازد. به عبارتی، با در دست داشتن یک مدل جامع از فرایند می‌توان عملکرد بهتری از کوره در راستای کاهش هزینه‌های تولید ایجاد نمود. در مطالعه حاضر، بخشی از فرایندهای اثرگذار در یک کوره دوار سیمان شبیه‌سازی شده و با مقایسه نتایج مدل و نتایج آزمایشگاهی می‌توان گفت که مدل از قابلیت خوبی جهت بسط دادن در سیستم‌های پخت مشابه برخوردار است. نتایج شبیه‌سازی شامل موارد زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

- ✓ تغییرات دمایی فازهای جامد، گاز و کوتینگ در طول یک کوره دوار
- ✓ تغییرات اتلاف گرمای بدنه در طول کوره دوار

### کلمات کلیدی:

کوره دوار، سیمان، انرژی، اتلاف گرما

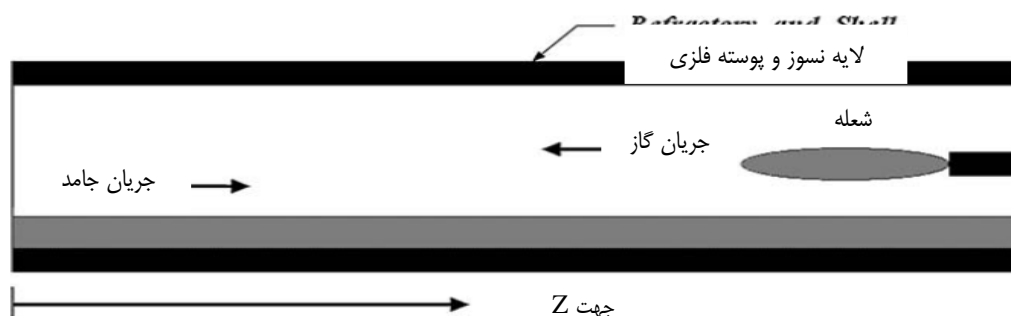
## مقدمه

امروزه در دنیا تأمین انرژی در کنار تأمین مواد اولیه، مهم‌ترین عامل در تولید سیمان محسوب می‌شود. تولید سیمان یک فرآیند به شدت انرژی‌بر می‌باشد [۳] و از کوره دوار به عنوان مهم‌ترین بخش فرآیند و قلب آن یاد می‌شود. در بیشتر کاربردهای صنعتی، هدف از کوره دوار کمک به انجام واکنش‌هایی خاص در بستر کوره است که به دلایل سنتیکی و یا ترمودینامیکی غالباً به دماهای بالا در بستر (برای مثال در کوره‌های سیمان تا حد ۲۰۰۰ درجه کلوین) نیاز دارند.

تولید غبار، بازده گرمایی پایین و کیفیت تولید نایکنواخت از جمله دشواری‌های کار با کوره‌های دوار است. لذا زمینه‌های بهبود فراوانی برای این جنبه از عملکرد کوره وجود دارد. برای دستیابی به این بهبودها به شناخت کمی دقیق‌تری درباره پدیده انتقال در درون مواد بستر بویژه انتقال اندازه حرکت نیاز است. کوره دوار با توجه به ماهیت پیچیده آن (واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی همزمان) و پارامترهای متعدد موثر بر کیفیت، معادلات دینامیکی پیچیده ای دارد. لذا تحقیق و پژوهش بر روی آن امری بسیار لازم و ضروری است [۱]. نگهداری و بهره‌برداری مداوم از کوره دوار بسیار حیاتی است. اما به دلیل بروز پدیده‌های ناگهانی و غیر خطی نظیر تشکیل و ریزش کوتینگ در حال تولید، کارکرد مداوم کوره ممکن نیست و پس از مدت زمانی نیاز به تعمیر کوره خواهد بود. این امر بسیار هزینه بر می‌باشد زیرا که توقف کوره به منزله توقف کل تولید است. پس با در دست داشتن یک مدل جامع از فرآیند می‌توان عملکرد بهتری از کوره ایجاد نمود. همچنین از مدل می‌توان جهت آموزش اپراتور بر حسب تجربه اپراتورهای خیره در این صنعت بهره گرفت [۴] و نهایتاً با کاهش مصرف انرژی در صنعت سیمان گام‌های موثری برداشت. لذا در این مقاله، فرآیندهای مختلف در یک کوره دوار که به طور گسترده در صنایع معدنی مختلف از جمله صنعت سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل‌سازی می‌گردد تا با استفاده از نتایج بدست آمده بتوان شرایط عملیاتی کوره دوار سیستم‌های پخت مشابه را کنترل و از میزان مصرف زیاد و بی‌رویه انرژی در صنعت مذکور جلوگیری کرد.

## شرح کیفی کوره دوار سیمان

نمایی ساده از کوره دوار سیمان در شکل (۱) نشان داده شده است. کوره دوار اساساً یک استوانه طول در حدود ۱۲۰-۵۰ متر (برای کوره‌های مدرن) است و ۳/۵-۶/۵ متر قطر دارد.



شکل (۱) نمایی ساده از یک کوره دوار سیمان

طول کوره به طور عمده به مدت زمانی که طول می‌کشد تا دمای مواد خام به دمای کلینکر شدن در حدود  $1370\text{ }^\circ\text{C}$  برسد، بستگی دارد. در طراحی‌های مدرن کارخانه، از یک سیکلون پیش‌گرمایش به منظور افزایش درجه حرارت مواد ورودی جامد به کوتاه شدن طول کوره استفاده می‌شود.

مواد خام شامل کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ )، سیلیس ( $\text{SiO}_2$ )، شیل ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) و سنگ آهن ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) به کوره تغذیه می‌شود. این ترکیبات به پودر بسیار ریز تبدیل و با توجه به نوع سیمان مخلوط می‌شوند [۶].

### موازنه انرژی

برای انجام موازنه انرژی در کوره دوار، درجه حرارت متوسط دیواره در این مدل مورد استفاده قرار گرفت. معادلات زیر برای گاز، جامد و دیواره به ترتیب [۱۰] نوشته شده است.

بر طبق معادله:

$$Q = \dot{m}_i C_{pi} \Delta T_i \quad (1)$$

که در آن،  $i$  از معادله (۲) جایگزین می‌شود:

$$\dot{m}_i = \rho_i v_i A_i \quad (2)$$

که برای معادلات انتقال دما در فاز گاز داریم:

$$A_g C_{pg} \rho_g v_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = \beta_1 (T_w - T_g) + \beta_2 (T_s - T_g) + Q_{comb} \quad (3)$$

که در آن، متوسط دانسیته گاز معادل  $0.85\text{ kg/m}^3$ ، ظرفیت گرمایی ویژه گاز معادل  $1173.8\text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  می‌باشد و  $A_g$  و  $v_g$  از معادلات (۴) و (۵) به دست می‌آید:

$$v_g = \frac{(\dot{m}_f + \dot{m}_a)}{A_g \cdot \rho_g} \quad (4)$$

$$A_g = \frac{r_1^2}{2} (p - \sin p) \quad (5)$$

که  $p$  زاویه احاطه شده جامد  $3\pi/2$  می‌باشد و در فاز جامد داریم:

$$A_s C_{ps} \rho_s v_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = \beta_2 (T_g - T_s) + \beta_3 (T_w - T_s) + A_s Q_c \quad (6)$$

که  $\rho_s$  دانسیته جامد معادل  $890\text{ kg/m}^3$ ،  $C_{ps}$  ظرفیت گرمایی ویژه جامد معادل  $1089.97\text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  می‌باشد، و  $A_s$

از معادلات (۷) و (۸) محاسبه می‌شود:

$$v_s = \frac{\dot{m}_s}{A_s \rho_s} \quad (۷)$$

$$A_s = \frac{r_1^2}{2} (2\pi - p + \sin p) \quad (۸)$$

دیواره:

$$\beta_1(T_g - T_w) + \beta_3(T_s - T_w) + \beta_4(T_a - T_w) = 0 \quad (۹)$$

و برای محاسبه گرمای واکنش داریم:

$$Q_c = \frac{\rho_s}{(1+A_i+F_i+S_i)} [-\Delta H_\xi k_1 \xi - \Delta H_\omega R_\omega - \Delta H_\beta R_\beta S(C)^2 - \Delta H_\alpha k_\alpha C \beta] \quad (۱۰)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} \Delta H_\xi &= 2.966 * 10^6 \text{ (J/kg)} & \Delta H_\alpha &= 25.59 * 10^3 \text{ (J/kg)} \\ \Delta H_\beta &= 887.37 * 10^3 \text{ (J/kg)} & \Delta H_\omega &= 2.256 * 10^6 \text{ (J/kg)} \end{aligned}$$

و  $A_w$  از معادله (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$A_w = 2\pi(r_2^2 - r_1^2) \quad (۱۱)$$

که  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  و  $\beta_4$  توابع غیرخطی درجه حرارت، ضرایب انتقال حرارت جابجایی و تشعشع و هندسی است که می‌تواند توسط معادلات (۱۲) تا (۱۶) محاسبه شود:

$$\beta_1 = 1.7307 r_2 p [f_1 + 1.73 \times 10^{-9} (1 - h_o) \varepsilon_g \varepsilon_w (T_g^2 + T_w^2) (T_g + T_w)] \quad (۱۲)$$

$$\beta_2 = 3.4314 r_1 \sin\left(\frac{p}{2}\right) [f_2 + 1.73 \times 10^{-9} (1 - h_o) \varepsilon_g \varepsilon_s (T_g^2 + T_s^2) (T_g + T_s)] \quad (۱۳)$$

$$\beta_3 = r_1 (2\pi - p) [f_3 + 1.73 \times 10^{-9} h \varepsilon_w \varepsilon_s (T_s^2 + T_w^2) (T_s + T_w)] \quad (۱۴)$$

که  $h_o$  کسر تشعشع معادل  $0.757$ ،  $\varepsilon_g = 0.1$ ،  $\varepsilon_s = 0.8$ ،  $\varepsilon_w = 0.9$  و  $h$  از معادله (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$h = 1 + \frac{2h_o \sin\left(\frac{p}{2}\right)}{2\pi - p} \quad (۱۵)$$

$$\beta_4 = 2\pi f_4 r_2 \quad (۱۶)$$

که  $f_1=f_2=f_3=f_4=22.71 \text{ W/m}^2/\text{°C}$  است. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت بین دیواره و محیط (هوای خارجی)،

اسپنگ<sup>۱</sup> از معادله (۱۶) استفاده می‌کند. این یک شرح کامل از ضرایب انتقال گرما بین سطح پوسته و محیط است. از آنجا که  $f_4$  در طول کوره ثابت بود،  $\beta_4$  حساس به شرایط در جهت طولی نمی‌شود. به منظور افزایش دقت و صحت مدل، ضریب انتقال حرارت از پوسته خارجی مجموع جابجایی  $h_{csh \rightarrow a}$  و تشعشع  $h_{Rsh \rightarrow a}$  در نظر گرفته شد که به ترتیب:

$$h_{csh \rightarrow a} = \frac{0.11k_a Pr^{0.36}}{D} (0.5Re_w^2 + Re^2 + Gr)^{0.35} \quad (17)$$

$$h_{Rsh \rightarrow a} = C' \varepsilon_{sh} \sigma T_{sh}^3 \quad (18)$$

که در آن،  $C'$  در معادله (۱۸) به دست می‌آید:

$$C' = \left\{ 1 + \frac{T_a}{T_{sh}} + \left( \frac{T_a}{T_{sh}} \right)^2 + \left( \frac{T_a}{T_{sh}} \right)^3 \right\} \quad (19)$$

که در آن،  $T_a = 5.6697 * 10^{-8} W/m^2 \cdot ^\circ C^4$  است و همان‌طور که می‌توان از معادله (۱۶) استنباط کرد،  $h_{csh \rightarrow a}$  وابسته به دما می‌باشد، برای اینکه  $Re$ ,  $Pr$  و  $Gr$  می‌تواند بشدت تحت تاثیر شرایط محیطی قرار گیرد. بنابراین، به منظور بهبود مدل، در ابتدا، درجه حرارت پوسته در طول کوره باید از اسکندر دمای پوسته ثبت شده باشد.

به منظور محاسبه دمای فیلم  $T_f$  بر حسب  $^\circ C$  سیال داخل کوره در المان در نظر گرفته شده از معادله (۲۰) می‌توان استفاده کرد:

$$T_f = \frac{T_{sh} + T_a}{2} \quad (20)$$

که در هر یک از المان‌های در نظر گرفته شده،  $T_{sh}$  دمای سطح پوسته کوره بر حسب  $^\circ C$ ،  $T_a$  دمای محیط بر حسب  $^\circ C$  می‌باشد. بنابراین، مقدار  $h_{csh \rightarrow a}$  می‌تواند در هر مقطعی در طول کوره محاسبه شود. پس از محاسبه دمای فیلم گروه‌های بی‌بعد در طول کوره محاسبه می‌شود. انتقال حرارت جابجایی روی بدنه کوره بر حسب اینکه عدد گراش و رینولدز چه وضعی نسبت داشته باشند، بررسی می‌شود. اگر عدد رینولدز بزرگتر از عدد گراش باشد ( $Re_D^2 > Gr$ )، جابجایی اجباری است. در غیر این صورت، جابجایی آزاد است. در حالت جابجایی اجباری:

$$Nu_{forced} = h_{sh} \frac{D}{k_\infty} = 0.3 + \frac{0.62Re_D^{0.5}Pr^{0.33}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.4}{Pr} \right)^{0.66} \right]^{0.25}} \left[ 1 + \left( \frac{Re_D}{28200} \right)^a \right]^b \quad (21)$$

که در آن،  $Nu_{forced}$  عدد ناسلت جابجایی اجباری و:

$$10^2 < Re_D < 10^4 \rightarrow a = \frac{5}{8}, b = \frac{4}{5}$$

1) Spang

$$4 \times 10^4 < Re_D < 10^7 \rightarrow a = \frac{1}{2}, b = 1$$

$$Re_D = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (22)$$

$$Gr_D = \frac{g \beta L^3 (T_{surf} - T_a)}{\nu^2} \quad (23)$$

$$= \frac{1}{T} \quad (24)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k_a} \quad (25)$$

و در حالت جابجایی آزاد:

$$Nu_{free} = h_{sh} \frac{D}{k_a} = 0.6 + \frac{0.386 Ra^{1/6}}{[1 + (\frac{0.559}{Pr})^{1/6}]^{8/27}} \quad (26)$$

که در آن، Ra عدد رایلی طبق معادله (۲۷) به دست می‌آید [۲]:

$$10^{-4} < Ra < 10^{12}, Ra = Pr Gr_D \quad (27)$$

#### مدل شعله

یک مدل شعله جریان پلاگ در کوره دوار سیمان استفاده می‌شود [۸]. در این مدل، منطقه شعله به  $n$  برش به اندازه مساوی تقسیم شده است. تعداد برش به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$n = \frac{F_L}{\text{simulation step-size}} \quad (28)$$

طول شعله به طور کلی،  $F_L$ ، از معادله بیر (Beer) به دست می‌آید:

$$F_L = 6d_0(1 + AF^*)(\frac{\rho_e}{\rho_{cp}})^{0.5}(\frac{\rho_e}{\rho_{se}})^{0.5} \quad (29)$$

جورج (Gorog)، کوره سیمان با مشعل هم‌محور (coaxial-type) تجهیز کرد [۷]:

$$\rho_e = \frac{\dot{m}_F + \dot{m}_{pa}}{\frac{\dot{m}_f}{\rho_F} + \frac{\dot{m}_{pa}}{\rho_{pa}}} \quad (30)$$

$$d_0 = \frac{\dot{m}_F + \dot{m}_{pa}}{[(G_F + G_{pa})\pi\rho_e]^{0.5}} \quad (31)$$

$$AF^* = \frac{AF\dot{m}_F - \dot{m}_{pa}}{\dot{m}_F} \quad (32)$$

مقدار  $f$  دبی جرمی سوخت می‌تواند از داده‌های اولیه کوره سیمان ثبت شود. مقدار  $pa$  دبی جرمی هوای اولیه با دانستن  $sa$  دبی جرمی هوای ثانویه محاسبه و هوای اضافی که ۱۰ درصد برای مشعل بود، محاسبه می‌شود.

در حال حاضر،  $Q_{comb}$  در معادله (۳) توسط عبارت (۳۳) محاسبه می‌شود:

$$Q_{comb} = \frac{m_F \times LHV + m_{pa} \times G_{pa} \times (T_{pa} - T_{ref}) + m_{sa} \times G_{sa} \times (T_{sa} - T_a)}{\text{Simulation step-size}} \quad (33)$$

### نرخ‌های سینتیکی واکنش‌های کوره دوار

نرخ واکنش‌های شیمیایی کوره دوار با استفاده از معادله آرنیوس را به صورت زیر می‌توان بیان کرد [۹]:

$$k_i = A_i \exp\left(\frac{-E_i}{RT_s}\right) \quad (34)$$

که  $R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot ^\circ\text{C}$  ثابت گاز و:

$$i = CaO, C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF, H_2O, CO_2$$

و بر حسب واکنش‌های شیمیایی موجود در کوره دوار سیمان داریم:

$$R_{H_2O} = \begin{cases} -k_{H_2O} \frac{M_{H_2O}}{M_{CaO}} & \frac{M_{H_2O}}{M_{CaO}} \leq 0.1 \\ -k_{H_2O} & \frac{M_{H_2O}}{M_{CaO}} > 0.1 \end{cases}$$

$$R_{CaCO_3} = -\frac{M_{CaCO_3}}{M_{CaO}} \cdot k_{CaO} \cdot C_{CaCO_3}$$

$$R_{C_3S} = -\frac{M_{C_3S}}{M_{CaO}} \cdot k_{C_3S} \cdot C_{CaO_3} \cdot C_{C_2S}$$

$$R_{C_2S} = -\frac{M_{C_2S}}{2M_{CaO}} \cdot k_{C_2S} \cdot C_{CaO_3}^2 \cdot C_{SiO_2} - \frac{M_{C_2S}}{M_{CaO}} \cdot k_{C_3S} \cdot C_{CaO} \cdot C_{C_2S}$$

$$R_{C_3A} = -\frac{M_{C_3A}}{3M_{CaO}} \cdot k_{C_3A} \cdot C_{CaCO_3}^3 \cdot C_{Al_2O_3}$$

$$R_{C_4AF} = -\frac{M_{C_4AF}}{4M_{CaO}} \cdot k_{C_4AF} \cdot C_{CaO_3}^4 \cdot C_{Al_2O_3} \cdot C_{Fe_2O_3}$$

$$R_{CaO} = k_{CaO} \cdot C_{CaCO_3} - k_{C_3S} \cdot C_{CaO} \cdot C_{SiO_2} - k_{C_2S} \cdot C_{CaO}^2 \cdot C_{SiO_2} - k_{C_3A} \cdot C_{CaO}^3 \cdot C_{Al_2O_3} - k_{C_4AF} \cdot C_{CaO}^4 \cdot C_{Al_2O_3} \cdot C_{Fe_2O_3}$$

$$R_{C_3S} = -\frac{M_{SiO_2}}{2M_{CaO}} \cdot k_{C_2S} \cdot C_{CaO}^2 \cdot C_{SiO_2}$$

$$R_{Fe_2O_3} = -\frac{M_{C_4AF}}{4M_{CaO}} \cdot k_{C_4AF} \cdot C_{CaO}^4 \cdot C_{Al_2O_3} \cdot C_{Fe_2O_3}$$

$$R_{CO_2} = \frac{A_s}{A_g} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_g} \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \cdot k_{CaO} \cdot C_{CaO_3}$$

موازنه جرم:

موازنه‌های جرم، معادلات (۳۵) و (۳۶) برای ۱۰ ترکیب جامد درگیر در واکنش‌ها در کوره‌های سیمان و جز گاز (CO<sub>2</sub>)

نوشته شده است:

$$R_i = \vartheta_s \frac{\partial C_i}{\partial z} \quad (35)$$

$$R_j = \vartheta_g \frac{\partial C_j}{\partial z} \quad (36)$$

i: H<sub>2</sub>O, CaCO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF با

j: CO<sub>2</sub> و

R<sub>i</sub> نرخ‌های سینتیکی فاز جامد و R<sub>j</sub> نرخ‌های سینتیکی فاز گاز در بخش قبل ارائه گردید. پارامترهای سینتیکی در جدول

(۱) آورده شده است.

جدول (۱) پارامترهای واکنش‌های سینتیکی در کوره دوار سیمان

Reaction Rate	A <sub>i</sub> (1/h)	E <sub>i</sub> (J/kmol)
$k_{H_2O}$	$1.94 \cdot 10^4$	$42.08 \cdot 10^6$
$k_{CaO}$	$4.55 \cdot 10^{31}$	$805.8 \cdot 10^6$
$k_{C_3S}$	$1.33 \cdot 10^5$	$256.19 \cdot 10^6$
$k_{C_2S}$	$4.11 \cdot 10^5$	$193.31 \cdot 10^6$
$k_{C_4AF}$	$8.33 \cdot 10^8$	$185.16 \cdot 10^6$
$k_{C_3A}$	$8.33 \cdot 10^6$	$194.10 \cdot 10^6$



### فرضیات مدلسازی

این فرضیات به شرح زیر است:

- ✓ قطر داخلی و خارجی کوره ثابت فرض شده است.
- ✓ گرماهای ویژه و واکنش مستقل از دما و آنها در امتداد جهت محوری ثابت بودند.
- ✓ هدایت در گازها و مواد جامد در جهت محوری از دیواره نادیده گرفته شد.
- ✓ ضرایب جابجایی و انتشار مستقل از دما و موقعیت هستند.
- ✓ ارتفاع و سرعت مواد جامد در هر مقطع کوره ثابت فرض شده است.
- ✓ مواد جامد منتقل شده توسط گازهای جریان گاز در مدل گنجانده نشده‌اند.
- ✓ نرخ واکنش توسط قانون آرنیوس مشخص شده است.
- ✓ مقدار متوسط هدایت کوتینگ معادل  $0.74 \text{ W/m}^2/\text{°C}$  در نظر گرفته شد.
- ✓ هدایت نسوز می‌تواند به وسیله معادله (۳۷) تخمین زده شود که به داده‌های تجربی مرتبط می‌شود که از سازنده نسوز، برای آجر نوع مگنتیت (magnetite-fired) گرفته می‌شود:

$$k_{refl} = 3195.5 \times T_{refl}^{(-0.9122)} \quad (37)$$

- ✓ هدایت پوسته فلزی معادل  $45 \text{ W/m}^2/\text{°C}$  در نظر گرفته می‌شود که نزدیک به آلیاژ فولاد کربن است.
- ✓ از آنجا که تغییرات هدایت پوشش نسوز در طول فرایند غیر ممکن بود، این مقدار از آغاز اجرا ثابت در نظر گرفته شد. این فرض می‌تواند یک منبع خطای فاحش در پیش‌بینی مدل باشد.
- ✓ تعداد نقاط دمایی پوسته اسکن شده برای یک چرخش کامل کوره در هر المان  $40$  بود. دمایی هر نقطه محاسبه از طریق موقعیت محوری یک مقدار میانگین از تمام نقاط در نظر گرفته شد.

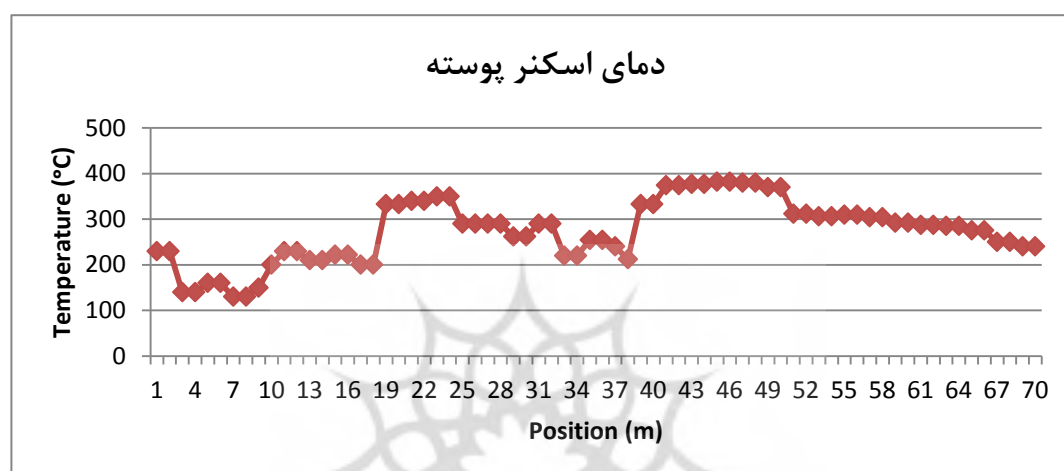
### کوره دوار سیمان مورد مطالعه

طول، قطر داخلی و خارجی کوره سیمان مورد مطالعه به ترتیب  $7.0$ ،  $4.1$  و  $4.5$  متر است. متوسط ضخامت پوشش نسوز مگنتیت  $15$  سانتی‌متر است که می‌تواند در طول منطقه پخت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. شیب استوانه برای تسهیل جابجایی محوری از بستر جامد، در حال حرکت به سمت انتهای تخلیه در حالی که گازهای داغ در یک حالت خلاف جهت در گردش بودند،  $4$  درصد بود.

### دمای اسکنر پوسته

در شکل (۲) درجه حرارت پوسته اندازه‌گیری شده توسط اسکنر ارائه شده است. همان‌طور که می‌توان از شکل دریافت، امکان اندازه‌گیری تغییرات شدید درجه حرارت پوسته توسط اسکنر وجود دارد. دلیل این پدیده، تغییر ضخامت کوتینگ

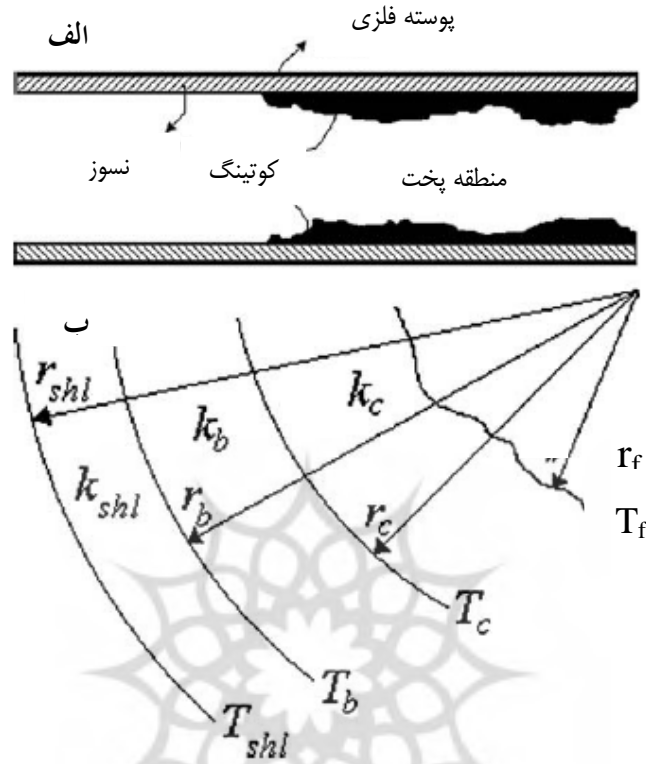
است. از آنجا که ضخامت کوتینگ از ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر برای حفاظت از نسوز در تمام مناطق منطقه پخت ایده‌آل است [۵]، برای حفظ ضخامت کوتینگ، درجه حرارت پوسته باید بین ۱۹۰ و ۲۲۰°C باشد. درجه حرارت پایین‌تر یک مانع برای حرکت جامد در طول کوره و مقدار بالاتر یک ضرر برای لایه نسوز محسوب می‌شود.



شکل ۲) دمای اسکندر پوسته در طول کوره مورد مطالعه

### شبیه‌سازی

معادلات جرم و انرژی یکپارچه شده با مدل شعله مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل و جبری هستند که به وسیله نرم‌افزار MATLAB R2014a (ver. 8.3) حل شده است. به دلیل نوع خاص معادلات در منطقه پخت، حل‌کننده ODE15S مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از حل مدل، پروفایل دمای دیواره به زیر برنامه ارسال می‌شود و با حل‌کننده ODE حل می‌شود. برای حل معادلات مدل، ODE طول کوره را به ۷۰ المان تقسیم‌بندی کرد. بنابراین، اندازه هر المان برای برنامه یک متر در نظر گرفته شد. لذا ماتریس دو بعدی تولید شده، درجه حرارت فازهای گاز، جامد و کوتینگ را در برابر طول کوره نشان می‌دهد. لایه‌های مقاومت بین داخل و سطح دیواره و محیط در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ (الف) لایه‌های دیواره در منطقه پخت کوره دوار سیمان. (ب) لایه‌های مقاومت

محاسبه اتلاف انرژی

جریان گرما در مختصات استوانه (بدون تولید گرما) به صورت معادله (۳۸) است [۹]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (38)$$

برای حالت یک بعدی با مفروضات زیر، معادله (۳۸) می‌تواند ساده شود:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (39)$$

فرضیات:

(۱) انتقال گرما از طریق لایه‌های دیواره کوره حالت پایدار (Steady-State) در نظر گرفته شد.

(۲) جریان گرمای هدایت در جهت Z نادیده گرفته شد.

بنابراین، بر طبق شکل (۳)، شرایط مرزی زیر می‌تواند تعریف شود.

لایه کوتینگ:  $at\ r = r_w, T = T_w, \quad \& \quad at\ r = r_c, T = T_c$

لایه نسوز:  $at\ r = r_c, T = T_c, \quad \& \quad at\ r = r_b, T = T_b$

لایه پوسته فلزی:  $at\ r = r_b, T = T_b, \quad \& \quad at\ r = r_{sh}, T = T_{sh}$

بنابراین، با اعمال شرایط مرزی در بالا و معادله (۳۹)، معادلات ۴۰ تا ۴۳ به دست می‌آید:

$$Q_{pass} = \frac{2\pi\Delta Z k_c (T_w - T_c)}{\ln\left(\frac{r_c}{r_w}\right)} \quad (40)$$

$$Q_{pass} = \frac{2\pi\Delta Z k_b (T_c - T_b)}{\ln\left(\frac{r_b}{r_c}\right)} \quad (41)$$

$$Q_{pass} = \frac{2\pi\Delta Z k_{sh} (T_b - T_{sh})}{\ln\left(\frac{r_{sh}}{r_b}\right)} \quad (42)$$

$$Q_{pass} = 2\pi\Delta Z r_{sh} h_{sh \rightarrow a} (T_{sh} - T_a) \quad (43)$$

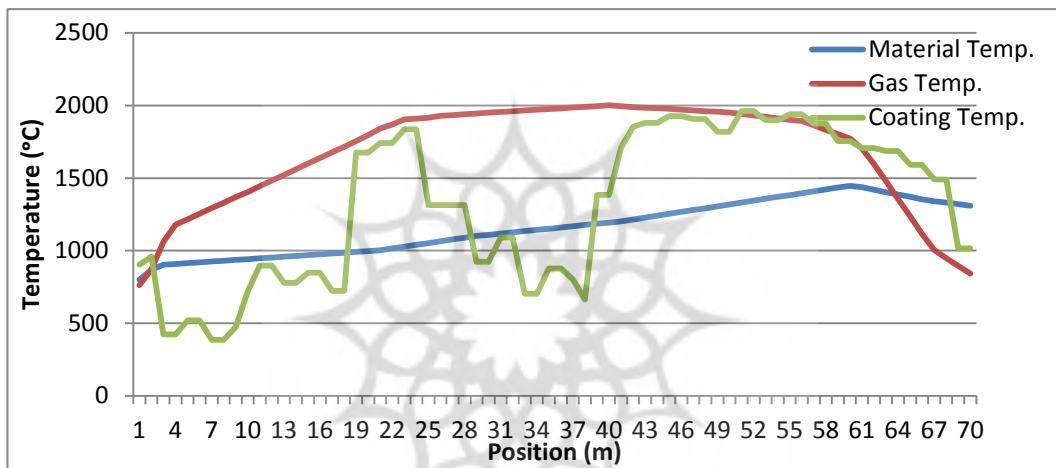
در هر مرحله (Z)، در ابتدا دمای دیواره داخلی کوره ( $T_w$ ) را می‌یابیم. معادلات (۱) تا (۳۲) به‌طور هم‌زمان در برنامه حل می‌شود. سپس با استفاده از معادلات (۴۳)، (۴۲) و (۴۱)،  $Q_{pass}$ ،  $T_b$ ،  $T_c$  به ترتیب می‌تواند محاسبه شود. در کد شبیه‌سازی، هر دو دمای دیواره داخلی کوره ( $T_w$ ) و دمای سطح پوسته کوره ( $T_{sh}$ ) به‌صورت ماتریس دو بعدی بر حسب نقاط طول کوره در نظر گرفته می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که معادلات مقاومت گرمایی (۴۰) تا (۴۳) می‌تواند برای انطباق عناصر ماتریس توسعه یابد. بنابراین، اتلاف گرما از بدنه در طول کوره محاسبه می‌شود.

جدول ۲) شرایط بهره‌برداری کوره دوار مورد مطالعه

۲۰	دمای هوای محیط (°C)
۵	سرعت هوا (m/s)
۱۰۰۰	دمای هوای ثانویه ورودی (°C)
۴۴۸۵۶	نرخ جریان هوای ثانویه (m <sup>3</sup> /h)
۵۴۷۹	نرخ جریان گاز (m <sup>3</sup> /h)
۲۰۵	نرخ خوراک (ton/h)
۲/۸	سرعت گردش کوره (rpm)

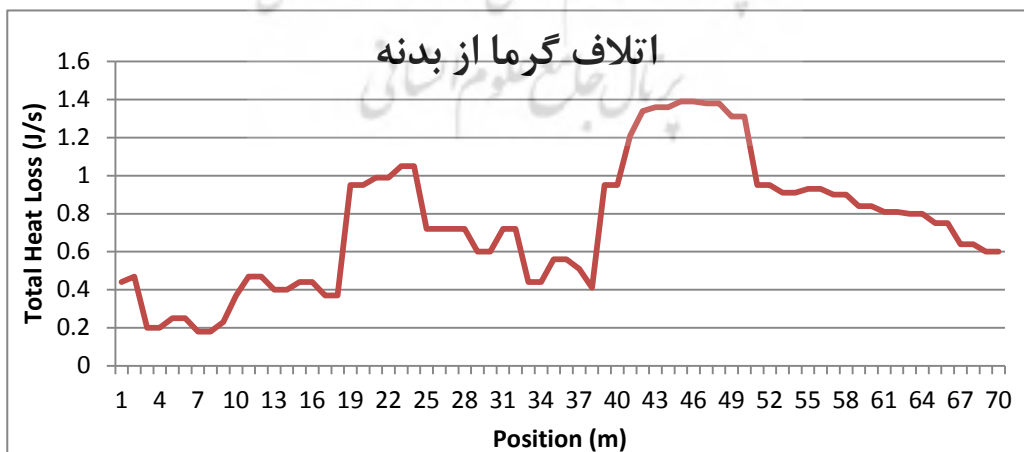
### نتایج و صحنه‌گذاری

در حال حاضر، با استفاده از نتایج حل معادلات در مطلب، می‌توان تغییرات دمایی فازهای جامد، گاز و کوتینگ را در کوره دوار مورد مطالعه بررسی نمود (شکل ۴). به منظور صحنه‌گذاری با گرفتن سه آزمایش در سه بازه زمانی مختلف از دمای اسکنر و با توجه به مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل، می‌توان بیان کرد که نتایج مدل با درصد انحراف بین  $+0/2$  و  $-3/9$  به دست آمده است که قابل تایید بوده و می‌توان بیان کرد مدل از قابلیت خوبی برای استفاده در کوره‌های دوار سیمان برخوردار است.



شکل ۴) تغییرات دمایی فاز گاز، فاز مواد و کوتینگ در طول ۷۰ متر کوره دوار مورد مطالعه

همچنین با توجه به معادلات مدل، می‌توان میزان اتلاف در طول کوره دوار را به دست آورد. (شکل ۵)



شکل ۵) میزان کل اتلاف‌های بدنه در طول ۷۰ متر کوره دوار مورد مطالعه

## نتیجه‌گیری

از آنجا که تغییرات دمایی فازهای گاز، جامد و کوتینگ در کوره‌های سیمان امری بسیار ضروری است و در شرایط بهره‌برداری کوره توسط اتاق کنترل فرایند، قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد، لذا لازم است یک مدل یکپارچه در کوره سیمان توسعه داده شود تا با استفاده از نتایج مدلسازی و اتلافات بدنه کوره با اعمال اقدامات موثر از جمله عایق کاری مناسب در طول کوره دوار جهت نگهداشت انرژی، در میزان مصرف انرژی صرفه‌جویی گردد. در ابتدا یک مدل ریاضی حالت پایدار (Steady-State) برای تخمین پروفایل دمای سطح داخلی دیواره کوره دوار فرموله شد. بعد از آن، به‌وسیله محاسبه پروفایل دما در طول کوره و پروفایل دمای اندازه‌گیری شده سطح بیرونی، اتلاف حرارت بدنه به‌وسیله مدل مقاومت‌های انتقال حرارت در مجاورت لایه‌های استوانه برآورد شد. مقایسه نتایج مدل و داده‌ها جمع‌آوری شده که از کوره صنعتی تایید می‌کند که مدل قابلیت خوبی برای تغییرات دمایی فازهای مختلف و اتلاف حرارت بدنه در تمامی کوره‌های دوار سیمان با اعمال شرایط بهره‌برداری دارد. علاوه بر این، نتیجه گرفته می‌شود در منطقه پخت کوره دوار که اتلاف حرارت از بدنه بیشتر است، دمای کوتینگ کمتر و ضخامت لایه کوتینگ مشکلی در جریان مواد ایجاد نمی‌کند.

## تقدیر و قدردانی

بدین‌وسیله از جناب آقای دکتر یآوری از شرکت مهندسی غدیر که در تهیه این مقاله مساعدت و همکاری داشتند کمال تشکر و امتنان را دارم.

## منابع

- [۱] آچمپونگ بوتنگ، آکواسی. (۱۳۹۱) "کوره‌های دوار"، شاکری، مسعود رضا. عقابی، مرضیه. جلد ۱، ویرایش اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
- [۲] حیدری، محمد مهدی. فراهانی، بیژن. (۱۳۸۶) "مطالعه چگونگی تعیین عمق بستر مواد در کوره دوار با استفاده از روش تحلیل معکوس"، فصلنامه علمی و پژوهشی شریف، شماره ۳۷، ۱۱۸-۱۰۷.
- [۳] کردارپور، فریبا. صوفی، طاهره. گشایشی، حمیدرضا. میرسنجری، امیر. (۱۳۹۲) "بررسی اتلاف‌های انرژی در صنایع سیمان و راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی"، ماهنامه بین المللی نفت و انرژی، شماره ۸۶، ۵۲-۴۲.
- [۴] نوشیروانی، غلامرضا. شیروانی، منصور. نورزاده، حمیدرضا. صدیقی، سپهر. (۱۳۸۸) "محاسبه و تخمین ضخامت کوتینگ کوره دوار سیمان" چهارمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب‌یابی ماشین آلات، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

- [5] Bokaian, M., "Cement Refractories and Building Materials," *Eng. Handbook, Vol. 2<sup>nd</sup> Persian ed., Training Department of Abyek Cement Industrial Complex, Iran (1994).*
- [6] Bouge, R. H., "The Chemistry of Portland Cement," 2<sup>nd</sup> ed., Reinhold, New York (1955).
- [7] Gorog, J. P., T. N. Adams and J. K. Brimacombe, "Heat Transfer From Flames in a Rotary Kiln," *Metallurg. Trans. B 14B, 411-423 (1982).*
- [8] Gorog, J. P., T. N. Adams and J. K. Brimacombe, "Heat Transfer From Flames in a Rotary Kiln," *Metallurg. Trans. B 14B, 411-423 (1983).*
- [9] Sadighi, S., Shirvani, M., Arshad., A., "Rotary cement kiln coating estimator", *The Canadian journal of chemical engineering, vol. 89:116-125, (2011).*
- [10] Spang, H. A., "A Dynamic Model of Cement Kiln," *Automatic 8, 309-323 (1972)*



## فهرست علائم

نماد	واحد	
A	(1/hr)	ضریب بسامد واکنش‌ها جز i
A <sub>g</sub>	m <sup>2</sup>	سطح گاز در المان
A <sub>i</sub>	-	مقدار اولیه kg Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / kg CaO
A <sub>s</sub>	m <sup>2</sup>	سطح جامد در المان
A <sub>w</sub>	m <sup>2</sup>	سطح دیواره در المان
AF	-	نسبت هوا - سوخت استوکیومتری
AF*	-	نسبت هوا - سوخت استوکیومتری شعله
C <sub>pi</sub>		گرمای ویژه جز i
C <sub>pg</sub>	J/kg/ C	گرمای ویژه گاز تولید شده
C <sub>ps</sub>	J/kg/ C	گرمای ویژه جامد
C	-	اکسید کلسیم
C <sub>2</sub> S	-	2CaO.SiO <sub>2</sub>
C <sub>3</sub> A	-	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
C <sub>4</sub> AF	-	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
d <sub>0</sub>	m	قطر معادل مشعل
D <sub>eq</sub>	m	قطر معادل کوره دوار
D <sub>in</sub>	m	قطر داخلی کوره دوار
D <sub>out</sub>	m	قطر خارجی کوره دوار
E <sub>i</sub>	J/kmol	انرژی فعال‌سازی واکنش‌ها جز i
f <sub>1</sub>	W/m <sup>2</sup> / C	ضریب هدایت گاز به دیواره
f <sub>2</sub>	W/m <sup>2</sup> / C	ضریب هدایت جامد به گاز
f <sub>3</sub>	W/m <sup>2</sup> /°C	ضریب هدایت دیواره به جامد
f <sub>4</sub>	W/m <sup>2</sup> /°C	ضریب هدایت دیواره به هوای محیط
G <sub>f</sub>	Kg/s	نرخ جریان سوخت
G <sub>pa</sub>	Kg/s	نرخ جریان هوای اولیه
Gr	-	عدد گراشف
F <sub>i</sub>	-	مقدار اولیه kg Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / kg CaO
F <sub>L</sub>	m	طول شعله
h <sub>o</sub>	-	کسر تشعشع
h <sub>sh a</sub>	W/m <sup>2</sup> /°C	ضریب انتقال گرمای سطح پوسته به هوا
k <sub>i</sub>	1/hr	ضریب آرنیوس واکنش جز i
k <sub>b</sub> , k <sub>refl</sub>	W/m <sup>2</sup> /°C	ضریب هدایت پوشش آجر یا نسوز
k <sub>c</sub>	W/m <sup>2</sup> /°C	ضریب هدایت کوتینگ



نماد	واحد	
$k_{sh}$	$W/m^2/^\circ C$	ضریب هدایت پوسته
$K$	-	نرخ واکنش‌های شیمیایی
LHV	J/kg	حد پایین ارزش حرارتی سوخت
$f$	kg/s	دبی جرمی سوخت
$p_a$	kg/s	دبی جرمی هوای اولیه
$s_a$	kg/s	دبی جرمی هوای ثانویه
$i$	kg/s	دبی جرمی جز $i$
$M_i$	-	جرم مولکولی شیمیایی جز $i$
$n$	-	تعداد برش
$Nu_{free}$	-	عدد ناسلت جابجایی آزاد
$Nu_{forced}$	-	عدد ناسلت جابجایی اجباری
$P$	-	زاویه احاطه شده به وسیله سطح جامد
$Pr$	-	عدد پرانتل
$Q_c$	$W/m^2$	گرمای تولید شده به وسیله واکنش‌های شیمیایی
$Q_{comb}$	J/s	گرمای حاصل از احتراق سوخت
$Q_{pass}$	J/s	جریان گرمای عبور کرده از داخل کوره به خارج
$r_1$	m	شعاع داخلی کوره
$r_2$	m	شعاع خارجی کوره
$R$	$J/mol/^\circ C$	ثابت گاز ایده‌آل
$R$	-	نرخ سینتیک شیمیایی
$Ra$	-	عدد رایلی
$Re_w$	-	عدد رینولدز چرخشی کوره
$Re_a$	-	عدد رینولدز هوا
$r_b$	m	فاصله شعاع از مرکز کوره تا سطح نسوز
$r_c$	m	فاصله شعاع از مرکز کوره تا سطح کوتینگ
$r_w$	m	فاصله شعاع از مرکز کوره تا سطح دیواره
$r_{sh}$	m	فاصله شعاع از مرکز کوره تا سطح پوسته
$S_i$	-	مقدار اولیه $kg SiO_2 / kg CaO$
$T_a$	C	دمای هوا
$T_b, T_{ref}$	C	دمای پوشش آجر یا نسوز
$T_c$	C	دمای کوتینگ
$T_g$	C	دمای گاز
$T_s$	C	دمای جامد
$T_{ref}$	C	دمای مرجع
$T_{sa}$	C	دمای هوای ثانویه

نماد	واحد	
$T_{sh}$	C	دمای سطح پوسته
$T_w$	C	دمای دیواره داخلی کوره
$u_a$	m/s	سرعت هوا
$\vartheta_a$	m <sup>2</sup> /s	ویسکوزیته سینماتیکی هوا
$v_g$	m/s	سرعت گاز
$v_s$	m/s	سرعت جامد
$\Delta Z$	m	سایز هر المان
<b>حروف یونانی</b>		
$\beta_1$	W/ C	ضریب انتقال حرارت بین گاز و دیواره داخلی
$\beta_2$	W/ C	ضریب انتقال حرارت بین گاز و جامد
$\beta_3$	W/ C	ضریب انتقال حرارت بین دیواره و جامد
$\beta_4$	W/ C	ضریب انتقال حرارت بین دیواره خارجی و محیط
$\mu$	kg/m.s	ویسکوزیته دینامیکی
$\rho_e$		دانسیته معادل سوخت به گاز
$\rho_g$	kg/m <sup>3</sup>	متوسط دانسیته گاز
$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	دانسیته جامد
	rad/s	سرعت چرخش کوره
	-	حرکت در راستای زاویه‌ای
$\theta$	degree ( )	نیم زاویه پر شده بستر کوره
<b>اندیس ها</b>		
S		جامد
G		گاز
W		دیواره
A		هوای محیط
In		داخلی
Out		خارجی
Sh		پوسته کوره
L		طول
total heat loss		کل اتلاف گرما
Pass		عبور کرده
b , reft		پوشش آجر یا نسوز