

سمپوزیوم فولاد ۸۵
۸ و ۹ اسفندماه ۸۵
تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

شبیه سازی فرآیند پخت گندله های اکسید آهن بر روی زنجیر متحرک

علی فردوسی^۱، سید خطیب الاسلام صدرنژاد^۲، حسن پایاب^۳

۱ و ۲- پژوهشگاه مواد و انرژی

۳- دانشگاه آزاد اسلامی

چکیده

کاهش مصرف انرژی در کوره های پخت گندله های اکسید آهن یکی از گامهای اساسی برای کاهش مصرف انرژی در تولید فولاد است. به منظور بررسی امکان کاهش مصرف سوخت، افزایش سرعت تولید و بهبود کیفیت گندله پخته شده، از مدلسازی فرآیند پخت گندله استفاده شده است. مدل در برگیرنده مراحل مختلف فرایند، یعنی خشک کردن، پیشگرم کردن، پخت و سرد کردن گندله های پخته می باشد. با در نظر گرفتن، خشک شدن رطوبت گندله ها و واکنشهای تکلیس سنگ آهک، اکسیداسیون مگنتیت و احتراق کربن و نیز گرادیان دمایی درون گندله، معادلات موازنه جرم، انرژی و مومنتوم برای کوره پخت گندله نوشته شده و به روش تفاضل محدود، به طور همزمان حل شده است. در نتیجه شبیه سازی فرایند، پروفیل دما، سرعت و ترکیب گاز در نقاط مختلف بستر و نیز تاریخچه دمایی گندله ها و چگونگی پیشروی واکنشهای فیزیکی و شیمیایی مختلف در درون گندله در طول فرآیند برای نقاط مختلف بستر بدست آمده است. از سوی دیگر، مدل قادر به پیش بینی میزان سوخت مصرفی و کیفیت گندله پخته است.

کلمات کلیدی: کوره پخت گندله، مدل ریاضی، شبیه سازی، موازنه جرم، انرژی و مومنتوم

¹ - ferdowsi79@yahoo.com

² - sadrnezh@sharif.edu

³ - h.payab@niscoir.com

مقدمه

گندله سازی یکی از روشهای آگلومراسیون نرمة سنگ های آهن است. نرمة سنگ آهن به همراه مواد افزودنی و رطوبت، در دستگاههای گندله ساز به گندله خام تبدیل شده و پس از آن پخته و سخت می شوند. [۱] پخت گندله خام در کوره های نوار زنجیری و یا ترکیبی از کوره زنجیری و کوره دوار انجام می شود. [۲] در این مقاله تمام توجه بر روی کوره نوار زنجیری است. در این روش گندله های خام بر روی لایه ای از گندله های پخته، بعنوان محافظ زنجیر، بار شده و تشکیل بستر فشرده می دهند. گاز گرم، بسته به درجه حرارت و مرحله پخت از بالا و یا از پایین به داخل بستر دمیده شده و در نهایت گندله ها سرد می شوند. این فرایند از چند ناحیه کلیدی تشکیل شده است. ناحیه خشک کردن با جریان رو به بالا (UDD)، خشک کردن با جریان روبه پایین (DDD)، ناحیه پیشگرم کردن (PH)، نواحی پخت (F_1 و F_2)، ناحیه پس از پخت (AF) و نواحی اول و دوم سرد کردن (C_1 و C_2) که علت این تقسیم بندی، دما و مسیر گاز ورودی و خروجی است. (شکل ۱) در مراحل پیشگرم و پخت، به منظور رساندن دمای گاز ورودی به دمای مورد نظر از مشعل استفاده می شود. [۲]

کوره های پخت گندله به علت مصرف انرژی زیاد آنها فرایندهایی گران هستند. به این دلیل در سالهای اخیر شرکت های تولید آهن فعالیتهای خود را برای بهبود شرایط کاری آنها افزایش داده اند. تعیین شرایط کاری بهینه سیستم، توسط روشهای تجربی امری وقت گیر و هزینه بر است زیرا حجم زیادی گندله پخته بدون کیفیت، تولید می شود. [۲] برای غلبه بر این مشکل می توان از شبیه سازی ریاضی فرآیند استفاده کرد. [۳ و ۴] یک مدل ریاضی می تواند انرژی مورد نیاز برای پخت گندله و کیفیت گندله حاصل را پیش بینی کرده و به کمک آن مصرف انرژی در فرایند بهینه شود. مدلهای زیادی برای فرایندهای مختلف پخت گندله ارائه شده است. یانگ و همکاران [۴] و ترلبای [۵-۷] مدلهایی برای فرایند زنجیر متحرک - کوره دوار ارائه کردند. ترلبای و همکاران [۳] و وینیکی و باترهام [۸] کارهایی در زمینه مدلسازی کوره پخت نوار زنجیری انجام دادند. کوکوکادا و همکاران [۹] و حمیدی و پایاب [۱۰] کوره آزمایشگاهی پخت گندله را شبیه سازی کردند. کراس و بلوت [۲] مدل ریاضی ارائه شده توسط یانگ را توسعه داده و با استفاده از آن تعیین کردند که بهتر است جهت جریان گاز در اولین مرحله خشک کردن رو به بالا یا پایین باشد. پاملیو و همکارانش [۱۱] به منظور بهینه سازی فرآیند، یک مدل ریاضی برای فرآیند پخت گندله بر روی زنجیر متحرک ارائه کردند و توسط این مدل مصرف سوخت فرایند را کاهش و سرعت تولید را افزایش داده اند. در مدل حاضر اولاً فرض شده است تا زمانی که رطوبت بیشتر از مقدار بحرانی است، حذف رطوبت توسط انتقال جرم در سطح گندله کنترل می شود و در زیر رطوبت بحرانی، گندله از یک پوسته خشک و یک هسته مرطوب تشکیل شده است. پس از خشک شدن گندله،

واکنش سنگ آهک، احتراق کک و اکسیداسیون مگنتیت رخ می دهند و قابل ملاحظه اند. در همه این واکنشها سه مرحله کنترل کننده وجود دارد: نفوذ از فیلم در سطح، نفوذ در داخل گندله متخلخل و انجام واکنش شیمیایی. توزیع دمایی درون گندله ها در طول زمان پخت و ارتباط جریان گاز میان نواحی مختلف، در شبیه سازی لحاظ شده است.

مدلسازی فرآیند پخت گندله

برای استخراج معادلات موازنه جرم و انرژی ابتدا بستر مانند شکل ۲ المان بندی شده است که: (۱) انتقال حرارت توسط تابش ناچیز است. (۲) پروفیل دمایی در عرض بستر یکسان است. (۳) تخلخل گندله ها در مراحل مختلف ثابت می ماند. (۴) فرآیند در حالت پایدار مدلسازی شده است. موازنه انرژی برای گاز عبوری از یک المان به ارتفاع Δz به صورت زیر است:

$$\frac{\partial(GC_g T_g)}{\partial z} + ha(T_g - T_p^s) = 0 \quad (1)$$

که G ، C_g و T_g به ترتیب سرعت، ظرفیت گرمایی و دمای گاز، T_p^s دمای سطح گندله، h ضریب انتقال حرارت و a مساحت سطح گندله ها در واحد حجم می باشد. در معادله ۱ از تغییر دمای گاز با زمان در مقایسه با انتقال حرارت توسط جابه جایی صرف نظر شده است. برای محاسبه دمای گندله در نقاط مختلف بستر، موازنه انرژی برای جامد عبوری از المانی به طول Δx نوشته می شود.

$$-\frac{\partial(MC_s T_s)}{\partial x} + ha(T_g - T_p^s) - (1 - \epsilon)\Delta H_v \frac{dW_p}{dt} + \sum (1 - \epsilon)R_i \Delta H_i = 0 \quad (2)$$

که C_s ظرفیت حرارتی گندله و M دبی جرمی بار جامد، ϵ و W_p تخلخل و رطوبت گندله و R_i و ΔH_i سرعت و تغییر انتالپی واکنشهای اجزای تشکیل دهنده گندله می باشند. گزارش شده است که گرا دیان دمایی بین سطح و مرکز گندله، نقش مهمی در تعیین کمترین زمان لازم برای پخت دارد. [۱] انتقال حرارت در داخل گندله توسط هدایت انجام شده و توسط معادله زیر بیان می شود: [۱۲]

$$k \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) + \sum \Delta H_j R_j + \Delta H_v \left(\frac{dW_p}{dt} \right) = \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (3)$$

که k هدایت حرارتی گندله می باشد. به علت انجام واکنشهای مختلف و همچنین تبخیر رطوبت در گندله، ترکیب گاز در طول بستر دائما در حال تغییر است. اثر این تغییرات با نوشتن معادلات موازنه جرم برای اجزاء گاز، وارد مدل می شود. سرعت عبور گاز از میان بستر گندله ها با استفاده از اختلاف فشار میان بالا و پایین بستر توسط معادله ارگان [۱۲] و با فرض ثابت بودن نفوذ پذیری بستر در طول فرآیند،

محاسبه می شود.

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu}{d^2 \varepsilon^3 \rho_g} G + \frac{1.75(1-\varepsilon)}{d \varepsilon^3 \rho_g} G^2 \quad (۴)$$

مدلسازی پیشرفت استحکام در گندله ها

از آنجا که مدلسازی ریاضی، به منظور بهینه سازی کارآیی فرایندهای گندله سازی، بویژه در کاهش سوخت مصرفی بکار می رود، باید در برگیرنده پیشرفت استحکام گندله در طول فرایند باشند. این مطلب به علت رابطه تنگاتنگ اما پیچیده میان سوخت مصرفی و استحکام گندله های پخته حاصل، اهمیت می یابد. کیفیت گندله تابعی از منحنی زمان- دمای گندله در طول مراحل پخت می باشد. به منظور مدلسازی افزایش استحکام در گندله یک پارامتر کیفیت، Q ، تعریف شده است. [۱۳]

$$Q_p = \int_0^t \frac{dQ}{dt} dt = \int_0^t \frac{A_0}{T} \left[\exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \right] (Q_f - Q) dt \quad (۵)$$

Q_f کیفیت نهایی است که بعد از یک بازه زمانی طولانی از سینتریگ در دمای T بدست خواهد آمد. در تعریف شکلی مناسب برای Q_f ضروری است که افزایش سریع کیفیت محصول پخته شده در نظر گرفته شود، که زمانی رخ میدهد که T از یک مقدار T_0 فراتر می رود: [۱۳]

$$Q_f = \alpha + \beta(T - T_0) \quad T > T_0 \quad \& \quad Q_f = \alpha \quad T \leq T_0 \quad (۶)$$

اندازه اولیه ذرات، طبیعت و مقدار افزودنیها، نوع کانی و شرایط گوی سازی بر روی پارامترهای آلفا، بتا، T_0 ، A_0 و E تاثیر گذارند. Q_p ، کیفیت محصول در پایان فرآیند پخت است. رابطه ۶ با فرض بازگشت ناپذیری افزایش استحکام، بدست آمده است. Q یک پارامتر عمومی است و می بایست به یک مقیاس صنعتی مطلوب تبدیل شود. رابطه اندیس سایش و پارامتر کیفیت بصورت زیر است: [۱۳]

$$Q = \frac{100 - AI}{AI} \quad (۷)$$

محاسبه گاز طبیعی مصرفی در فرآیند پخت گندله

در یک کوره پخت گندله، گاز خروجی از یک ناحیه، گاز ورودی به نواحی دیگر را تشکیل می

دهد. به منظور تنظیم دمای این جریان گاز، در نواحی پخت و پیشگرم از مشعل استفاده می‌شود. به منظور محاسبه حجم گاز طبیعی مورد نیاز برای رساندن دمای جریان گاز به مقدار مطلوب، معادلات موازنه جرم و انرژی برای جریانهای گاز در نواحی مختلف، نوشته شده است. به عنوان مثال برای ناحیه پخت:

$$\dot{m}_F = \dot{m}_{Cl \rightarrow F} + \dot{m}_{air} + \dot{m}_{N.G.} \quad (8)$$

$$\int_{Cl}^F \dot{m}_{Cl} \cdot c_{p,Cl} dT + \int_{air}^F \dot{m}_{air} \cdot c_{p,air} dT + \int_{N.G.}^F \dot{m}_{N.G.} \cdot c_{p,N.G.} dT = 0 \quad (9)$$

با حل همزمان معادلات ۸ و ۹ دبی گاز طبیعی مورد نیاز در ناحیه پخت و پس از آن ترکیب گاز ورودی به بستر در هر ناحیه تعیین می‌شود. در این معادلات، TN.G. دمای شعله گاز طبیعی می‌باشد. معادلات با روش تفاضل محدود، به طور همزمان حل شده و در نتیجه آن، میزان پیشروی واکنشهای فیزیکی و شیمیایی مختلف در طول فرآیند، دمای گاز و گندله در ارتفاعات مختلف بستر و در طول فرآیند و نیز دمای گندله در شعاعهای مختلف آن تعیین می‌شود. علاوه بر این میزان سوخت مصرفی در فرآیند و کیفیت گندله پخته، به طور خاص اندیس سایش آن، پیش بینی می‌شود.

نتایج و بحث

بررسی اعتبار نتایج شبیه سازی

با وجود اینکه شرایط درون بستر در طول کوره می‌تواند برای بررسی اعتبار نتایج شبیه سازی مفید باشد، به دلایل عملی و هزینه زیاد، اندازه گیری آن امکان پذیر نیست. [۲ و ۳] در این تحقیق به منظور بررسی صحت نتایج شبیه سازی، از نتایج دیگران [۱۴ و ۱۵]، نتایج حاصل از کوره آزمایشگاهی، و اطلاعات جمع آوری شده از کارخانه، استفاده شده است. در شکل ۳ پروفیل دمایی گندله‌ها، با نتایج ارائه شده توسط محققین دیگر مقایسه شده است. به این منظور تمامی ویژگیهای گندله‌های شارژ شده به کوره، با مراجع مورد نظر یکسان در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر در شکل ۴ دمای گاز با نتایج حاصل از کوره آزمایشگاهی گندله سازی مقایسه شده است. این نوع مقایسه نمی‌تواند انطباق کاملی بین نتایج تئوری و تجربی ایجاد کند زیرا ظرفیت حرارتی کوره، به همان اندازه گندله اهمیت می‌یابد. با این وجود، همخوانی کیفی میان نتایج تئوری و تجربی دلیلی بر صحت نتایج است. [۴] در جدول ۱ سوخت مصرفی در فرآیند پخت و کیفیت گندله پخته پیش بینی شده توسط شبیه سازی با داده‌های تجربی بدست آمده از خط یک گندله سازی فولاد خوزستان مقایسه شده است. از آنجا که کوره پخت گندله کاملاً ایزوله نبوده و دارای نشتی به محیط می‌باشد، سوخت مصرفی تخمین زده شده توسط مدل کمتر از مقادیر تجربی است.

نتایج حاصل از شبیه سازی

به کمک شبیه سازی، پروفیل دمایی و رویدادهای درون گندله در طول پخت بررسی شد. در جداول ۲ تا ۴ ویژگیهای گندله ها و شرایط کوره، در حالت مورد بررسی، ارائه شده است. شکل ۵ تغییر رطوبت گندله های قرار گرفته در ارتفاعات مختلف بستر را در طی فرایند پخت نشان می دهد. با توجه به نمودار، رطوبت گندله های موجود در ارتفاع ۱۱ سانتیمتری (اولین لایه گندله خام) به سرعت کاهش یافته و پس از رسیدن به مقدار رطوبت بحرانی، رطوبت گندله ها با سرعت کمتری کاهش می یابد. گندله های موجود در این لایه، تمام رطوبت خود را در اولین ناحیه خشک کردن، از دست می دهند. برای گندله های قرار گرفته در ارتفاع ۲۰ سانتیمتری، ابتدا رطوبت گندله به سرعت کاهش یافته و به مقدار بحرانی می رسد از آن پس سرعت خشک شدن کاهش می یابد. مشاهده می شود که در این لایه از گندله ها، به دلیل ورود گندله به ناحیه دوم خشک کردن و تغییر جهت جریان گاز عبوری از بستر، مجدداً سرعت خشک شدن کاهش می یابد. برای گندله های موجود در لایه های بالاتر، ۳۰ و ۴۰ سانتیمتری، مشاهده می شود که در ابتدا، رطوبت گندله ها افزایش یافته و سپس کاهش می یابد که علت این امر اشباع گاز از رطوبت و کندانس شدن رطوبت بر روی گندله ها می باشد. گندله های قرار گرفته در لایه های میانی بستر، آخرین گندله هایی هستند که به طور کامل رطوبت خود را از دست می دهند. از سوی دیگر، تمام رطوبت گندله ها در نواحی خشک کردن تبخیر نمی شود و خشک شدن مقداری از گندله ها در ناحیه پیشگرم تکمیل می شود. شکل ۶ تغییرات شعاع هسته دارای سنگ آهک را در طول پخت گندله نشان می دهد. شیب منحنی ها در شکل نشان دهنده سرعت واکنش تکلیس است. تکلیس سنگ آهک از اولین ناحیه خشک کردن شروع شده و تا ابتدای ناحیه اول پخت ادامه می یابد. پس از ورود گندله ها به ناحیه دوم خشک کردن، واکنش تکلیس در گندله های قرار گرفته در ارتفاع ۱۱ سانتیمتری به علت کاهش دمای گاز عبوری، متوقف شده و تا ناحیه پخت متوقف باقی می ماند. مشاهده می شود که بیشتر مقدار سنگ آهک در ناحیه پیشگرم تکلیس می شود. در شکل ۷ تغییرات شعاع هسته مگنتیتی گندله در زمان پخت نشان داده شده است. این واکنش در ناحیه پیشگرم شروع شده و تا ناحیه دوم پخت ادامه می یابد. در نواحی خشک کردن دمای گندله برای آغاز واکنش کافی نیست. در شکل ۸ پروفیل دمایی گاز عبوری از میان بستر در ارتفاعات مختلف آن در طول زمان پخت گندله نشان داده شده است. در این شکل، در آن نواحی که جریان گاز به سمت بالا است، دمای گاز در ارتفاع صفر دمای گاز ورودی بوده و دمای گاز در ارتفاع ۴۰ سانتیمتری، دمای گاز خروجی از بستر می باشد و برای نواحی با جریان پایین رو، عکس این مطلب صحیح است. پروفیل دمایی گندله ها در طول زمان پخت در شکل ۹ نشان داده شده است. از مقایسه شکلهای ۵ و ۹ نتیجه می شود تا زمانی که رطوبت گندله ها تبخیر نشده است، دمای آنها

به طور محسوسی نمی‌تواند افزایش یابد. کیفیت گندله پخته به تدریج به دامی گندله در طول پخت وابسته است. [۱۳] نحوه تغییر اندیس سایش گندله در ناحیه پخت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که گندله‌هایی که در ارتفاع ۳۰ و ۴۰ سانتیمتری قرار گرفته‌اند، زمان کافی برای پخت را دارند اما در ارتفاع ۲۰ و ۱۱ سانتیمتری گندله‌ها به مدت کافی در دمای پخت قرار نگرفته و قبل از پخت کامل سرد می‌شوند. به کمک برنامه شبیه‌سازی کوره پخت گندله، اثر افزایش مگنتیت موجود در مواد اولیه بر میزان مصرف گاز طبیعی کوره و کیفیت گندله پخته بررسی شد. به این منظور مقدار مگنتیت گندله خام از ۰ تا ۶۰٪ تغییر کرده و اثر آن بر فرآیند توسط مدل پیش‌بینی شد. در این بررسی‌ها شرایط بستر گندله‌ها و دمای تنظیم مشعل‌های کوره در تمام موارد ثابت در نظر گرفته شد. شکل ۱۱ تاثیر مگنتیت بر مصرف گاز طبیعی و اندیس سایش محصول نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در شرایط مورد بررسی افزایش مگنتیت تاثیر زیادی بر سوخت مصرفی فرآیند ندارد. میزان سوخت مورد نیاز برای پخت گندله‌های حاوی ۶۰٪ مگنتیت در مقایسه با گندله‌های کاملاً هماتیتی، ۰/۳۵٪ کاهش یافته است. اگر هدف تولید محصولی با کیفیت مشخص باشد در این صورت با افزایش مگنتیت موجود در گندله، می‌توان دمای تنظیم مشعل‌ها را کاهش داد. [۱۵] در این حالت تاثیر مگنتیت بر میزان سوخت مصرفی در کوره افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر در شکل ۱۷ تاثیر مگنتیت بر اندیس سایش گندله‌های پخته نشان داده شده است. در شرایط مورد بررسی تاثیر مگنتیت بر کیفیت گندله چشمگیر می‌باشد که به دلیل عدم تغییر در دمای تنظیم مشعل‌ها و افزایش دمای گندله‌ها در اثر اکسایش مگنتیت است. [۱۵]

نتیجه‌گیری

یک مدل ریاضی برای فرآیند پخت گندله‌های اکسید آهن بر روی زنجیر متحرک ارائه شده است. انتقال حرارت، تبخیر رطوبت، تکلیس سنگ آهک و اکسایش مگنتیت و کربن، با در نظر گرفتن توزیع دمایی درون گندله مدل شده‌اند. همخوانی خوبی میان نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد. شبیه‌سازی کوره پخت می‌تواند ابزار مفیدی برای طراحی مراحل مختلف پخت، به منظور دستیابی به خواص مورد نظر، باشد. از سوی دیگر شبیه‌سازی قادر به تخمین کیفیت نهایی گندله به صورت تابعی از موقعیت آن در بستر می‌باشد و بنابراین می‌توان از آن در تعیین مسیر گرمایش لازم، به منظور دستیابی به کیفیت مطلوب گندله پخته، سود جست. علاوه بر این می‌توان توسط مدل اثر متغیرهای مختلف فرآیند را بر روی انرژی مصرفی و کیفیت گندله پخته بررسی کرد.

تشکر و قدردانی

از همکاری های مدیریت و پرسنل محترم تحقیق و توسعه و پرسنل واحد گندله سازی و پایلوت پلنت گندله سازی شرکت فولاد خوزستان که ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند، سپاسگزاری می شود.

مراجع

- [1] K. Meyer, "Pelletizing of Iron Ores", 1980, Berlin, Springer-Verlag.
- [2] M.Cross and P.Blot, "Optimizing the Operation of Straight-Grate Iron-Ore Pellet Induration Systems Using Process Models", Metallurgical and Materials Transactions, 1999, 30B, pp. 803-813.
- [3] J.A.Thurlby, R.J.Batterham and R.E.Turner, "Development and Validation of a Mathematical Model for the Moving Grate Induration of Iron Ore Pellets", International Journal of Mineral Processing, 1979, No.6, pp. 43-64.
- [4] R.W.Young, M. Cross and R.D.Gibson, "Mathematical Model of Grate-Kiln-Cooler Process Used for Induration of Iron Ore Pellets", Ironmaking and steelmaking, 1979, No.1, pp. 1-13.
- [5] J.A.Thurlby, "A Dynamic Mathematical Model of the Complete Grate/Kiln Iron Ore Pellet Induration Process", Metallurgical Transactions, 1988, 19B, pp. 103-112.
- [6] J.A.Thurlby, "Gas Flow and Pressure Balancing in Modeling Grate/Kiln Induration", Metallurgical Transaction, 1988, 19B, pp. 113-121.
- [7] J.A.Thurlby, "Energy Cost Minimization in Grate/Kiln Induration", Metallurgical Transaction, 1988, 19B, pp. 122-132.
- [8] J.R.Wynnyckyj and R.J.Batterham, "Iron Ore Sintering and Pellet Induration Processes", 4th International Symposium on Agglomeration, Toronto, Canada, 1985, pp. 957-994.
- [9] K. Kucukada, J. Thibault, D. Hodouin, G. Paquet and S.Caron, "Modeling of a Pilot Scale Iron Ore Pellet Induration Furnace", Canadian Metallurgical Quarterly, 1994, Vol.33, No.1, pp. 1-12
- [10] A.A.Hamidi and H.Payab, "Mathematical Model for Energy Saving in Induration of Iron Ore Pellets Containing Solid Fuel", IJE, 2003, Vol.16, No.3, pp. 265-278.
- [11] D.Pomerleau, D.Hodouin and E.Poulin, "A First Principle Simulator of an Iron Oxide Pellet Induration Furnace- An Application to Optimal Tuning", Canadian Metallurgical Quarterly, 2005, Vol. 44, No. 4, pp.571-582.
- [12] R.B.Bird, W.E.Stewart and E.N.Lightfoot, "Transport Phenomena", 2002, New York, John Wiley & Sons, Inc.
- [13] R.J.Batterham, "Modeling the Development of Strength in Pellet", Metallurgical Transactions, 1986, 17B, pp.479-485.
- [14] J.H.Voskamp and J.Brasz, "Digital Simulation of the Steady State Behavior of Moving Bed Processes", Measurement and Control, 1975, vol.8, pp. 23-32.
- [15] T.M.Han, "Evolution of Pellets Processed from Magnetic Ore Concentrates in the Grate-Kiln-Cooler System", Process Mineralogy, 1986, vol.5, pp. 459-483.

جدول ۱. مقایسه مقادیر پیش بینی شده سوخت مصرفی فرآیند و اندیس سایش با داده های کارخانه

نتایج شبه سازی	داده های کارخانه	
۲۰/۰۵	۲۰/۸۷	مصرف گاز طبیعی (Nm^3/ton)
۳/۳۶	۳/۲۴	اندریس سایش

جدول ۲. ترکیب گندله شارژ شده به کوره

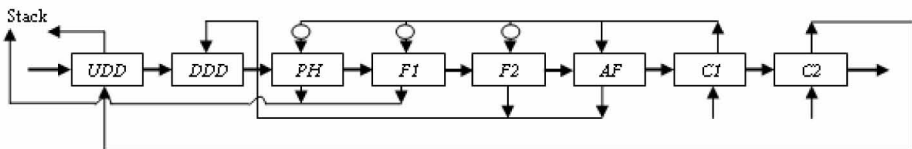
ترکیب	Fe_2O_3	Fe_3O_4	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	رطوبت
درصد	۶۳/۶	۲۵/۵	۰/۷	۰/۹	۰/۴	۰/۴	۸/۵

جدول ۳. ویژگیهای گندله و بستر در قسمت ورودی

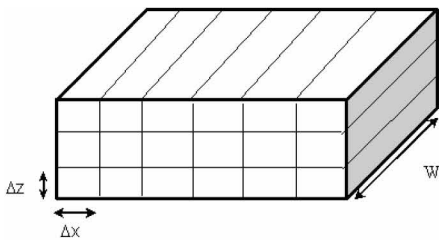
سرعت بستر	ارتفاع لایه محافظ	ارتفاع گندله خام	تخلخل بستر	قطر گندله	تخلخل گندله
۳ m/min	۱۰ cm	۳۰ cm	۳۹ %	۱/۲ cm	۳۰ %

جدول ۴. نقطه تنظیم دمای گاز در نواحی دارای مشعل

شماره مشعل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
دمای نقطه تنظیم ($^{\circ}\text{C}$)	۸۴۰	۸۶۰	۱۱۶۰	۱۳۰۰	۱۳۲۰	۱۳۳۰	۱۳۲۰	۱۲۸۰

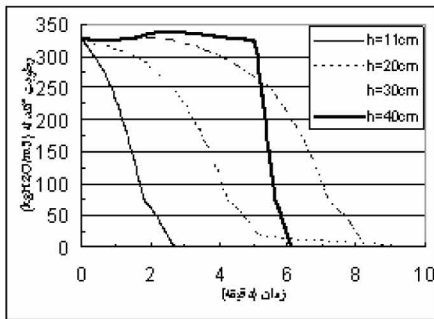
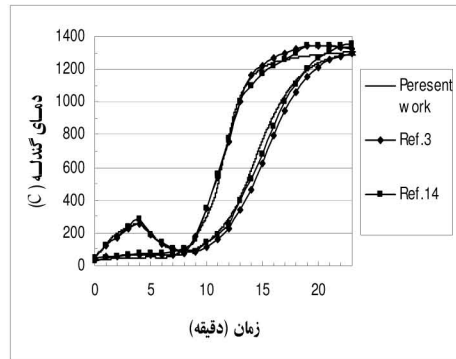


شکل ۱. دیاگرام شماتیک جریان گاز و گندله در فرآیند پخت (دایره ها نشان دهنده مناطق دارای مشعل هستند)

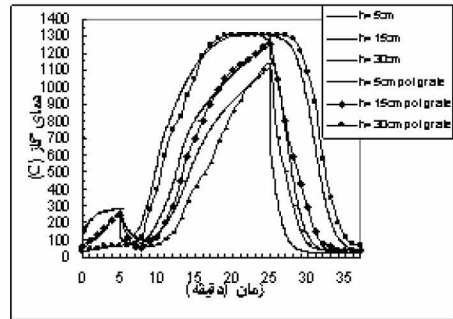


شکل ۲. المان بندی مورد استفاده در این تحقیق

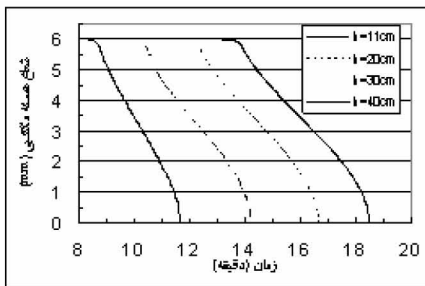
شکل ۳. مقایسه پروفیل دمایی گندله ها با نتایج حاصل از کارهای دیگران [۱۴ و ۳]



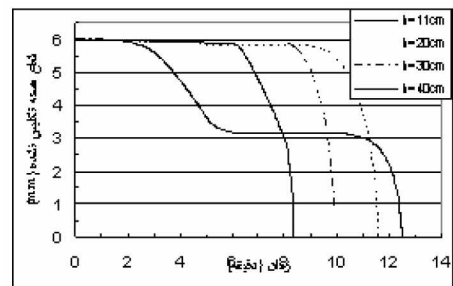
شکل ۵. تغییرات رطوبت گندله ها در طی فرآیند پخت



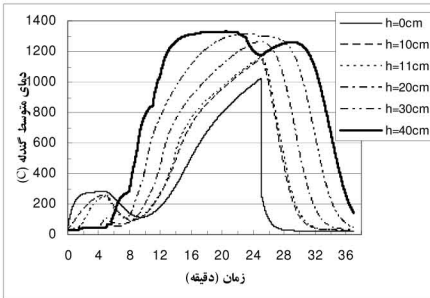
شکل ۴. مقایسه نتایج مدل با نتایج کوره آزمایشگاهی



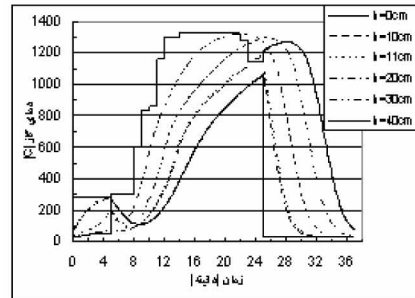
شکل ۷. تغییرات شعاع مگنتیت موجود در گندله



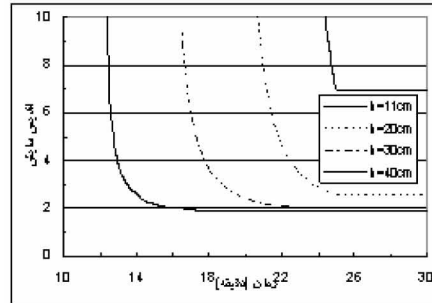
شکل ۶. تغییرات شعاع سنگ آهک در گندله



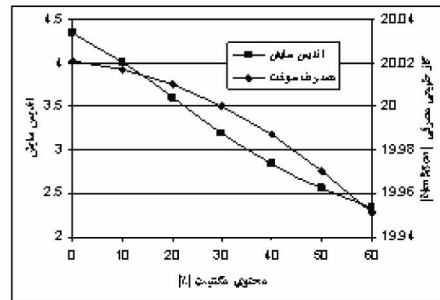
شکل ۹. تغییرات دمای متوسط گندله‌ها در زمان پخت



شکل ۸. پروفیل دمایی گاز در نقاط مختلف بستر



شکل ۱۰. تغییرات اندیس سایش گندله‌ها در طول پخت



شکل ۱۱. اثر مگنتیت بر سوخت مصرفی و اندیس سایش گندله