



P.G.S.E.Z

منطقه ویژه صنایع معدنی
و فلزی خلیج فارس

سمپوزیوم فولاد ۸۶

۳۰ بهمن و ۱ اسفندماه ۸۶

بندرعباس - منطقه ویژه صنایع معدنی و فلزی خلیج فارس



انجمن آهن و فولاد ایران

بررسی اثر ویژگیهای گندله‌های خام سنگ آهن بر فرآیند پخت بر روی زنجیر متحرک به کمک شبیه‌سازی

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

۱ و ۲- پژوهشگاه مواد و انرژی

۳- شرکت ملی فولاد

چکیده

استحکام مناسب گندله پخته شده، هدف اصلی فرآیند پخت می باشد و اغلب به صورت شاخص برای کنترل کارخانه‌های گندله‌سازی استفاده می‌شود. از سوی دیگر کاهش میزان سوخت مصرفی و در نتیجه هزینه‌های پخت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی اثر متغیرهای مختلف بر میزان مصرف انرژی و کیفیت گندله پخته توسط روش‌های تجربی کاری وقت گیر و هزینه‌بر است. به این منظور می‌توان از مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی کامپیوتری فرآیند پخت گندله سود جست. در اینجا با استفاده از شبیه‌سازی تأثیر کسر حفره بستر گندله‌ها، تخلخل و قطر گندله خام بر میزان مصرف سوخت و اندیس سایش گندله پخته تعیین شده است.

کلمات کلیدی: گندله، شبیه‌سازی، مصرف سوخت، اندیس سایش، تخلخل، حفره.

^۱ - ferdowski79@yahoo.com

^۲ - sadrnezh@sharif.edu

^۳ - payab@mme-co.de

مقدمه

در بیشتر روش‌های صنعتی تولید آهن امکان استفاده از ذرات نرم سنگ آهن تغلیظ شده وجود ندارد بنابراین آگلومراسیون آنها ضروری است. یکی از روش‌های آگلومراسیون نرمه‌های سنگ آهن، گندله‌سازی است. برای تولید گندله خام، نرمه سنگ آهن به همراه بنتونیت و دیگر افزودنی‌ها (مثل سنگ آهک و نرمه کک) و رطوبت، جهت دستیابی به شکل کروی در دستگاه‌های گندله ساز به چرخش در آمده تا گندله خام تولید گردد [۱]. گندله‌های خام که توسط دیسک تولید می‌شوند دارای استحکام کمی بوده و باید به روش معینی سخت شوند. به این منظور گندله‌های خام بر روی باند پخت پهن شده و تشکیل بستر فشرده می‌دهند، با عبور گازهای گرم از میان بستر، ابتدا گندله‌ها خشک شده، سپس پخته و سخت می‌شوند، در نهایت با عبور هوا از میان بستر و به منظور بازیابی حرارت، گندله‌ها سرد می‌شوند [۲].

انتظار اساسی از گندله‌های پخته شده، کیفیت خوب و یکنواخت آنها است تا در حین مراحل پخت و انتقال گندله شکسته و یا نرم نشود. بنابراین باید صرف نظر از مواد اولیه‌ای که در تولید آنها بکار رفته، مورد مصرف آنها و روشی که برای ساختن آنها انتخاب شده است، این کیفیت در آنها ایجاد شده باشد. دو مکانیزم اساسی بر بالا بردن استحکام گندله دخالت دارند: [۱]

- تغییر ساختار بلوری ناشی از اکسایش مگنتیت به هماتیت و رشد بلورهای آن و یا رشد بلور در هنگامی که فقط از هماتیت استفاده می‌شود.
- واکنش بین اجزای تشکیل دهنده سرباره از قبیل سیلیس، آلومین و آهک با یکدیگر و با اکسید آهن.

این دو مکانیزم همزمان با هم در گندله در مرحله پخت و حرارت دادن انجام می‌پذیرد. نخست بلورهای ریز جدید تشکیل و همزمان پلهای بین دانه‌ای در مرز بلورها تشکیل می‌شود. برای گندله‌های بدون فلاکس، افزایش استحکام گندله وابسته به واکنشهای زینتر شدن است که با افزایش چگالی و کاهش حجم گندله همراه است. مکانیزم‌ها مشابه فشرده سازی پودرها است و کاهش انرژی سطحی نیروی محرکه سینترینگ می‌باشد. [۳] در گندله‌های فلاکس دار، در طول تکلیس فازهای مایع ظاهر می‌شوند و افزایش چگالی می‌تواند با سرعت خیلی بیشتری رخ دهد. جمع شدن ذرات می‌تواند منجر به کاهش زیاد مساحت بین سطحی و انقباض شود. همچنین فازهای مایع می‌توانند باعث توسعه واکنشهای شیمیایی و رسوب محلول شوند که استحکام دهی را بیشتر افزایش می‌دهد [۴].

انقباض در سینترینگ دارای اهمیت اساسی است و با افزایش استحکام همراه است. طبیعت رابطه انقباض- استحکام آشکار یا یکسان نیست اما به بطور تجربی نشان داده شده است که برای یک گندله با ترکیب مشخص، استحکام و تخلخل دارای رابطه منفردی هستند [۴].

علاوه بر کیفیت مناسب گندله پخته، کاهش میزان انرژی مصرفی و بنابراین هزینه‌های فرآیند پخت نیز از اهمیت به سزایی برخوردار است. بنابراین بررسی اثر متغیرهای مختلف بر فرآیند پخت و یافتن شرایطی که در آن افزایش کیفیت با کاهش مصرف انرژی همراه است بسیار مفید خواهد بود. بررسی اثر متغیرهای مختلف بر فرآیند پخت گندله توسط روش‌های تجربی امری وقت گیر و هزینه بر است. برای غلبه بر این مشکل می توان از شبیه سازی کامپیوتری فرآیند پخت سود جست. محققین زیادی با استفاده از مدل‌های ریاضی، فرآیند پخت گندله را مورد بررسی قرار داده و از آن به منظور شناخت، کنترل و بهینه سازی فرآیند پخت گندله استفاده کرده‌اند. یانگ و همکاران [۵] مدل‌هایی برای فرآیند زنجیر متحرک- کوره دوار ارائه کردند. ترلبای و همکاران [۶] و وینیکی و باترهام [۷] کارهایی در زمینه مدلسازی کوره پخت نوار زنجیری انجام دادند. کوکوکادا و همکاران [۸] 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. پاملریو و همکارانش [۹] به منظور بهینه‌سازی فرآیند، یک مدل ریاضی برای فرآیند پخت گندله بر روی زنجیر متحرک ارائه کردند و توسط این مدل مصرف سوخت فرآیند را کاهش و سرعت تولید را افزایش داده‌اند.

روش تحقیق

در اینجا به منظور بررسی اثر تخلخل و قطر گندله و کسر حفره بستر گندله‌ها بر فرآیند پخت، از شبیه سازی کامپیوتری فرآیند استفاده شده است. برای این منظور معادلات موازنه جرم، انرژی و مومنتوم برای گاز و بستر گندله‌ها نوشته شده است. معادلات ۱ و ۲ به ترتیب موازنه انرژی را برای بستر گندله‌ها و گاز نشان می‌دهند.

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

$$\frac{\partial(GC_g T_g)}{\partial z} + ha(T_g - T_p^s) = 0 \quad (2)$$

که در این روابط C_s ظرفیت حرارتی گندله، M دبی جرمی بار جامد، ε و W_p تخلخل و رطوبت گندله، R_i و ΔH_i سرعت و تغییر انتالپی واکنشهای اجزای تشکیل دهنده گندله، 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 باشند.

با حل معادلات موازنه جرم و انرژی، دمای گندله ها بصورت تابعی از موقعیت آنها در کوره و زمان پخت تعیین می شود. در این مدل توزیع دمایی درون گندله و ارتباط قسمت های مختلف کوره پخت با یکدیگر نیز در نظر گرفته شده است و بنابراین مدل قادر به پیش بینی میزان گاز طبیعی مصرفی در فرآیند می باشد.

به علت رابطه تنگاتنگ و پیچیده میان سوخت مصرفی و استحکام گندله های پخته حاصل، شبیه سازی کامپیوتری باید دربرگیرنده افزایش استحکام گندله در طول فرآیند باشد. کیفیت گندله تابعی از منحنی زمان-دمای گندله در طول مراحل پخت است. به منظور مدلسازی افزایش استحکام در گندله یک پارامتر کیفیت، Q ، به صورت معادله ۵ تعریف شده است. [۴]

$$Q_p = \int_0^t \frac{dQ}{dt} dt = \int_0^t \frac{A_0}{T} \left[\exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \right] (Q_f - Q) dt \quad (5)$$

در این معادله Q_f کیفیت نهایی است که بعد از یک بازه زمانی طولانی از سینترینگ در دمای T بدست خواهد آمد. اندازه اولیه ذرات، طبیعت و مقدار افزودنی ها، نوع کانی و شرایط گوی سازی بر روی پارامترهای Q_f ، A_0 و E تاثیر می گذارند. Q_p ، کیفیت محصول در پایان فرآیند پخت است و رابطه ۵ با فرض بازگشت ناپذیری افزایش استحکام، بدست آمده است. Q یک پارامتر عمومی است و باید به یک مقیاس صنعتی مطلوب تبدیل شود. رابطه اندیس سایش و پارامتر کیفیت بصورت زیر است: [۴]

$$Q = \frac{100 - AI}{AI} \quad (6)$$

بنابراین باحل معادلات موازنه انرژی، جرم و مومنتوم و تعیین پروفیل دمایی گندله ها و گاز در نقاط مختلف بستر، میزان سوخت مصرفی توسط کوره و نیز کیفیت گندله های پخته تعیین خواهد شد. به منظور بررسی درستی نتایج حاصل از شبیه سازی، نتایج بدست آمده با نتایج تجربی و کارهای سایر محققین بررسی شده است [۱۰].

در این مقاله اثر قطر و تخلخل گندله و کسر حفره بستر گندله ها بر میزان انرژی مصرفی در فرآیند پخت و کیفیت گندله پخته بررسی شده است. اثر ارتفاع و سرعت حرکت ماشین پخت، میزان مگنتیت و کک موجود در گندله خام در جای دیگر بررسی شده است [۱۰-۱۲]. ترکیب گندله خام مورد بررسی مطابق جدول ۱ می باشد. شرایط بستر گندله ها در قسمت بارگیری کوره در جدول ۲ ارائه شده است.

برای بررسی اثر قطر گندله بر فرآیند، گندله‌هایی با تخلخل ۳۰٪ و تخلخل بستر ۳۹٪ در نظر گرفته شده و اثر تغییر قطر گندله از ۱۱mm تا ۱۶mm مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی اثر تخلخل بر مصرف انرژی و کیفیت محصول، گندله‌هایی به قطر ۱۲mm و بستری با تخلخل ۳۹٪ در نظر گرفته شد و اثر تغییر تخلخل گندله‌ها از ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ بر فرآیند تعیین گردید. برای تعیین اثر کسر حفره بستر بر فرآیند پخت گندله، گندله‌هایی با قطر ۱۲mm و تخلخل ۳۰٪ در نظر گرفته و اثر تغییر تخلخل بستر از ۳۵٪ تا ۴۵٪ بر میزان مصرف انرژی و اندیس سایش گندله پخته تعیین شده است.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی قادر به محاسبه دمای گاز در هر نقطه از بستر و دمای گندله به صورت تابعی از موقعیت آن در بستر و فاصله از مرکز گندله می‌باشد بنابراین تاریخچه دمایی گندله‌ها در طول فرآیند پخت تعیین شده و در نتیجه کیفیت گندله‌ها و میزان مصرف انرژی در فرآیند پخت تعیین می‌شود.

در شکل‌های ۱ و ۲ اثر قطر گندله بر میزان انرژی مصرفی و کیفیت گندله پخته نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش قطر گندله‌ها میزان انرژی مصرفی افزایش می‌یابد که علت این امر افزایش سرعت عبور گاز از میان بستر گندله‌ها بر اساس معادله ارگان [۱۰ و ۱۳] و بنابراین افزایش دبی گازهای داغ و در نتیجه افزایش حجم گاز طبیعی و یا سوخت مصرفی دیگر در فرآیند پخت می‌شود. از سوی دیگر با افزایش قطر گندله، اندیس سایش آن کاهش می‌یابد که افزایش سرعت گازها و افزایش دمای گاز در قسمتهای پایین بستر منجر به بهبود کیفیت گندله‌های قرار گرفته در قسمتهای زیرین بستر و در نتیجه افزایش کیفیت محصول می‌شود.

اثر تخلخل گندله‌ها بر میزان انرژی مصرفی و اندیس سایش در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تخلخل میزان مصرف انرژی افزایش یافته و کیفیت گندله پخته کاهش می‌یابد. با افزایش تخلخل گندله، در شرایط مورد بررسی، هدایت حرارتی آن کاهش یافته و بنابراین انتقال حرارت ضعیف شده و در نتیجه مصرف سوخت کوره پخت افزایش می‌یابد. از سوی دیگر به طور تجربی نشان داده شده است که برای یک گندله با ترکیب مشخص، استحکام و تخلخل دارای رابطه منفردی هستند [۴]. بنابراین افزایش تخلخل گندله با کاهش کیفیت محصول همراه است. این مطلب در معادله ۵ مستتر است. علاوه بر این کاهش انتقال حرارت نیز از سوی دیگر منجر به کاهش کیفیت گندله پخته می‌شود.

کسر حفره و یا تخلخل بستر عبارت از نسبت حجم فضای خالی موجود میان گندله‌های قرار گرفته در بستر به حجم کل بستر گندله می‌باشد. در شکل‌های ۵ و ۶ اثر تخلخل بستر گندله‌ها بر میزان سوخت مصرفی و اندیس سایش گندله‌های پخته نشان داده شده است. با افزایش کسر حفره بستر مصرف انرژی در فرآیند پخت افزایش می‌یابد. علت این امر افزایش سرعت عبور گاز از میان بستر، به دلیل ثابت بودن افت فشار میان بالا و پایین آن، و در نتیجه افزایش سوخت مصرفی است. بهبود کیفیت گندله‌ها نیز به علت افزایش دمای گازهای عبوری از نواحی زیرین بستر گندله‌ها و در نتیجه بهبود کیفیت گندله‌های موجود در ارتفاعات زیرین آن و به تبع آن کاهش اندیس سایش میانگین بستر است.

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی کوره پخت گندله می‌تواند ابزار مفیدی برای طراحی مراحل مختلف پخت و بررسی اثر عوامل مختلف بر میزان مصرف انرژی فرآیند و کیفیت گندله پخته باشد. در اینجا اثر قطر و تخلخل گندله و کسر حفره بستر بر مصرف انرژی و اندیس سایش گندله بررسی شده است. با افزایش قطر، مصرف انرژی و کیفیت گندله افزایش یافته است. افزایش تخلخل گندله مصرف سوخت را افزایش داده و منجر به کاهش کیفیت محصول می‌شود. اثر افزایش کسر حفره بستر مشابه اثر افزایش قطر گندله است.

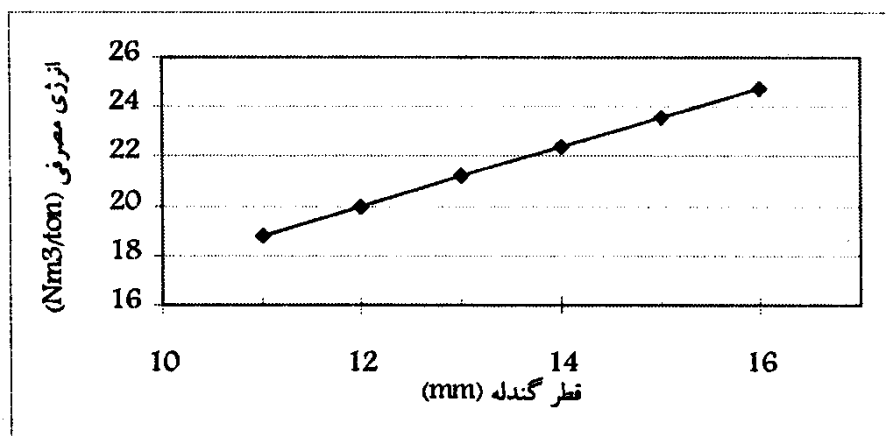
مراجع

- [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] C. B. Alcock, "Principles of Pyrometallurgy", 1976, New York, Academic Press.
- [4] R. J. Batterham, "Modeling the Development of Strength in Pellet", Metallurgical Transactions B, 17B, 1986, pp.479-485.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] J. R. Wynnykyj and R. J. Batterham, "Iron Ore Sintering and Pellet Induration Processes", 4th International Symposium on Agglomeration, Toronto, Canada, 1985, pp. 957-994.

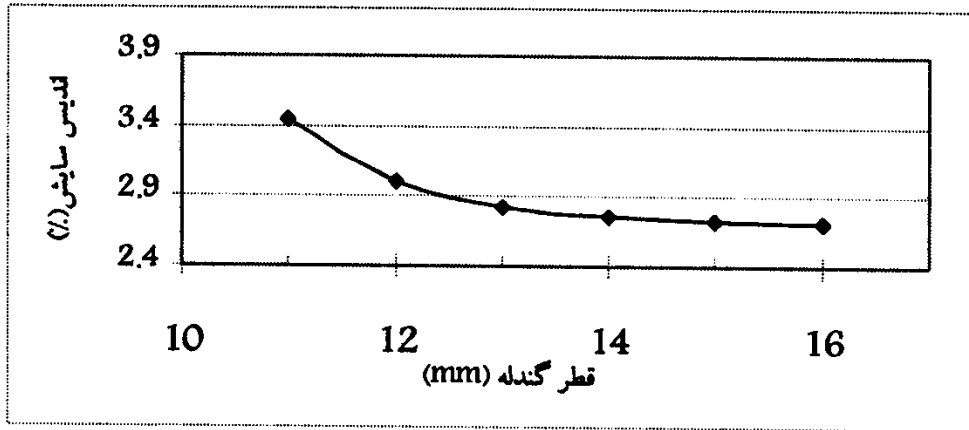
- [8] K. Kucukada, J. Thibault, D. Hodouin, G. Paquet and S. Caron, "Modeling of a Pilot Scale Iron Ore Pellet Induration Furnace", Canadian Metallurgical Quarterly, 1994, Vol. 33, No.1, pp. 1-12.
- [9] D. Pomerleau, D. Hodouin and E. Poulin, "A First Principle Simulator of an Iron Oxide Pellet Induration Furnace- An Application to Optimal Tuning", Canadian Metallurgical Quarterly, 2005, Vol. 44, No. 4, pp.571-582.
- [۱۰] علی فردوسی، سید خطیب الاسلام صدرنژاد و حسن پایاب، " شبیه سازی فرآیند پخت گندله های اکسید آهن بر روی زنجیر متحرک"، سمپوزیوم فولاد ۸۵، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۵، ص ۱۰۹-۱۱۹.
- [۱۱] علی فردوسی، سید خطیب الاسلام صدرنژاد و حسن پایاب، "بررسی اثر ارتفاع بستر و سرعت گریت بر فرآیند پخت پیوسته گندله های اکسید آهن"، دهمین کنگره سالیانه انجمن مهندسين متالورژی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۵.
- [۱۲] علی فردوسی، سید خطیب الاسلام صدرنژاد و حسن پایاب، "بررسی اثر افزودن سوخت جامد به گندله خام بر فرآیند پخت گندله های سنگ آهن به کمک شبیه سازی کامپیوتری"، یازدهمین کنگره سالیانه انجمن مهندسين متالورژی ایران، شرکت ذوب آهن اصفهان، ۱۳۸۶.
- [13] R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot, "Transport Phenomena", 2002, New York, John Wiley & Sons, Inc.

جدول ۱ ترکیب گندله خام مورد بررسی.

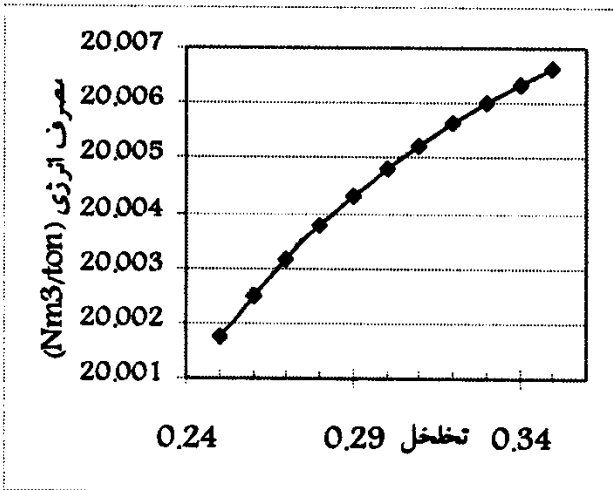
ترکیب	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	رطوبت
درصد	۶۳/۶	۲۵/۵	۰/۷	۰/۹	۰/۴	۰/۴	۸/۵



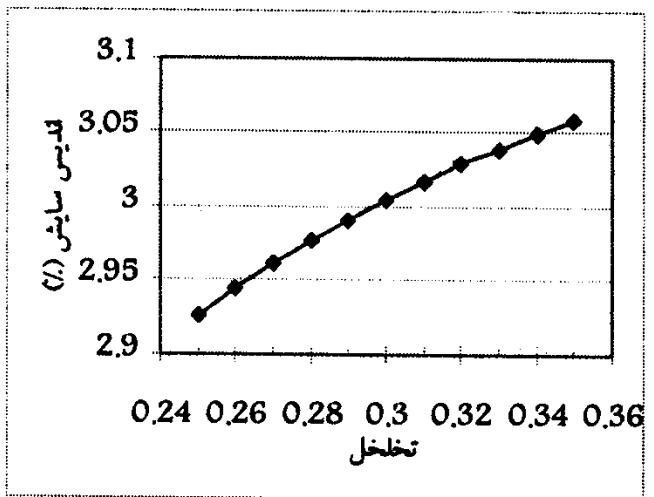
شکل ۱. اثر قطر گندله بر میزان انرژی مصرفی در فرآیند پخت.



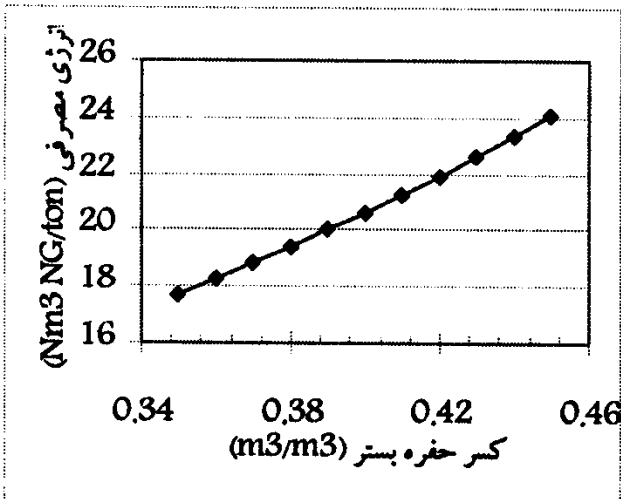
شکل ۲. اثر قطر گندله بر کیفیت گندله پخته.



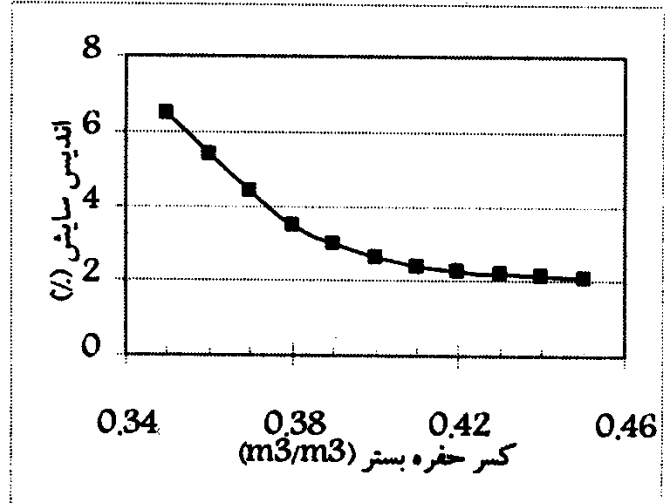
شکل ۴. اثر قطر گندله بر کیفیت گندله پخته.



شکل ۳. اثر قطر گندله بر مصرف انرژی فرآیند پخت.



شکل ۶. اثر تخلخل بستر گندله بر کیفیت محصول.



شکل ۵. اثر تخلخل بستر بر مصرف انرژی فرآیند پخت.