

بررسی اکسیدشدن مگنتیت به هماتیت در مرحله پیشگرم گندله کنسانتره سنگ آهن با استفاده از روش طراحی آزمایش

محمد شیخ شاب بافقی، منصور سلطانی، علی اکبر گائینی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

msbafghi@iust.ac.ir

چکیده: مطالعه فرآیند سخت کردن گندله خام، بررسی هر کدام از مراحل سخت گردانی را شامل می‌گردد. یکی از مراحل مهم در فرآیند سخت کردن گندله خام، مرحله پیشگرم می‌باشد. اکسیداسیون مگنتیت به هماتیت مهمترین واکنشی است که در مرحله پیشگرم رخ می‌دهد. هدف این پژوهش، بررسی اثر عوامل دما و زمان جهت تعیین مدل ریاضی برای اکسیداسیون مگنتیت به هماتیت در مرحله پیشگرم گندله کنسانتره سنگ آهن با استفاده از روش طراحی آزمایش می‌باشد. برای این کار، یک طرح عاملی کامل با دو عامل دما و زمان پیشگرم و هر کدام در چهار سطح مورد استفاده قرار گرفت. مدل ریاضی $R = 37/5177 - 2/3187 T^2 + 16/058 T - 5/372 t^2 + 26/762 t$ برای بازده اکسایش بر حسب پارامترهای دمای پیشگرم و زمان پیشگرم بدست آمده‌است. نتایج آزمایش‌ها، تاثیر نزدیک دما و زمان پیشگرم در بازده اکسایش را نشان می‌دهد.

کلید واژه: گندله، پیشگرم، اکسیداسیون، طراحی آزمایش، مدل ریاضی.

۱- مقدمه

گندله سازی یکی از روش‌های تبدیل ذرات و نرمه مواد اولیه به توده‌های متراکم است. گندله محصول نهایی فرایند گندله سازی و ماده اولیه برای فرایندهای تولید آهن خام در کوره بلند و تولید آهن اسفنجی به روش‌های متعدد احیای مستقیم می‌باشد. چون گندله، ماده اولیه برای تولید آهن خام است، لذا باید در کوره‌های احیا، ویژگی‌های مکانیکی- شیمیایی و حرارتی مطلوبی را داشته باشد. مواد اولیه نظیر کنسانتره سنگ آهن، بنتونیت و آب پس از مخلوط شدن، در دیسک گندله ساز در اثر پیوند بین ذرات مرطوب، گلوله‌ها تشکیل شده و پس از رشد آن‌ها گندله خام بدست می‌آید. پس از تولید گندله خام عملیات سخت گردانی بر روی آن انجام می‌گیرد. عملیات سخت گردانی شامل مراحل خشک کردن، پیشگرم کردن و پخت است.

مرحله پیشگرم در ادامه مرحله خشک شدن به طور پیوسته از ۳۲۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. در خلال پیشگرم کردن، واکنش‌های مختلفی مثل تبخیر آب تبلور، تجزیه هیدرات‌ها، کربنات‌ها، سولفات‌ها، تشویه گوگرد موجود در سولفیدها و تبدیل اکسیدهای آهن موجود و عمدتاً اکسایش مگنتیت به هماتیت به شکل موازی و متوالی رخ می‌دهد که تابع ترکیب شیمیایی مواد اولیه است.

سرعت فرآیند پیشگرم بیشتر به اکسایش مگنتیت وابسته است. در سخت کردن گندله‌های مگنتیتی زمان پیشگرم شدن طولانی‌تر و زمان پخت کوتاه‌تر می‌باشد. اکسیداسیون مگنتیت به هماتیت واکنشی به شدت گرمازا است.



در عملیات گرمادهی مگنتیت در محیط اکسیدکننده سه مرحله اصلی مشاهده می‌شود. در مرحله اول اکسیداسیون در دمای پائین و زیر 400°C انجام می‌شود، بعد از آن مرحله دوم اکسیداسیون شروع و در دمای بین 900°C و 1100°C کامل می‌شود. مرحله سوم زمانی شروع می‌شود که تجزیه هماتیت به مگنتیت صورت می‌گیرد [۲،۱].

در ضمن فرآیند اکسیداسیون، سوزن‌های هماتیت با نفوذ یون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} در فاز مگنتیت تشکیل می‌گردد و سرعت نفوذ با تغییر در مقدار نابیایی‌ها و ناخالصی‌ها و جاهای خالی تغییر می‌کند [۱]. به طور کلی خواص کانی مگنتیت بر روی آن تاثیر می‌گذارد. اکسیداسیون دمای بالا برای ذرات کنسانتره مگنتیت گندله شده با حالت پودری آن تفاوت بسیاری دارد. چون در گندله ذرات مگنتیت در تماس نزدیک با بنتونیت و مواد افزودنی هستند [۱].

در گندله، تخلخل بر سرعت نفوذ اکسیژن موثر است و سرعت اکسیداسیون با زینتر شدن و تشکیل سرباره، به دلیل کاهش تخلخل، کاهش می‌یابد. اکسیداسیون مگنتیت در گندله به چندین دلیل بسیار مهم است. آزاد شدن انرژی اکسیداسیون در محاسبه مقدار انرژی کل مورد نیاز برای فرایند گندله سازی اهمیت فراوانی دارد. اکسیداسیون مگنتیت پیوند قوی بین ذرات ایجاد می‌کند و این امر موجب استحکام بیشتر و تولید غبار کمتر در کوره می‌شود [۳،۱].

مقدار اکسیداسیون ثابت بر روی پایداری فرایند تولید گندله تاثیر بسیاری دارد. تغییر در مقدار اکسیداسیون گندله بدست آمده از مرحله پیش گرم باعث ایجاد نوسان در مقدار اکسیداسیون مورد نیاز در مراحل بعدی می‌شود که این امر ضرورت تغییر در آماده سازی هوا با دمای مناسب را باعث می‌شود [۳].

الگوی اکسیداسیون و پیشینه حرارتی گندله مگنتیتی بر خواص گندله نهایی تاثیر گذار می‌باشد. اگر فرایند اعمال حرارت به طور مناسبی صورت نگیرد، گندله دارای ساختار دو لایه‌ای می‌گردد که در این ساختار هسته به شدت زینتر شده و لایه خارجی کمتر زینتر می‌شود و حالت جدایش بین دو لایه پدید می‌آید. لایه خارجی قبل از رسیدن به دمای زینتر، اکسید می‌شود و گرمای حاصل دمای مرکز را به دمای زینتر می‌رساند. این حالت بیشتر در اکسیداسیون در دماهای بالاتر از 1000°C درجه سانتیگراد دیده شده است. یکی از راه حل‌های جلوگیری از ایجاد ساختار دو لایه‌ای^۱ انجام اکسیداسیون کامل قبل از شروع زینتر شدن می‌باشد که به آن پخت دوتایی گفته می‌شود. مقدار اکسیداسیون قابل قبول بعد از مرحله پیش گرم به منظور رسیدن به استحکام مناسب پس از پخت، ۸۰ درصد پیشنهاد شده است [۱].

تغلیظ کردن گاز اکسید کننده در مرحله پیش گرم تا حدود ۳۰ درصد اکسیژن و کنترل سرعت افزایش دما در حد کمتر از مقدار ۱۵۰، جهت بهبود خواص گندله پیشنهاد شده است [۱].

پاپاناستیسو^۲ و بیتسینیس^۳ [۳] تحقیقات جامع بر روی مکانیسم اکسیداسیون گندله مگنتیتی در اوایل ۱۹۷۰ میلادی انجام دادند. موضوعات بررسی شده تاثیر فشار جزیی اکسیژن، تخلخل گندله، اندازه گندله، مقدار ریزی کنسانتره مگنتیتی بر

¹ Duplex Structure

² Papanastassiou

³ Bitsianes

روی اکسیداسیون گندله می‌باشد. اکسیداسیون لایه خارجی گندله به سرعت انجام می‌گیرد و با سرعت واکنش شیمیایی کنترل می‌گردد. بعد از اکسیداسیون سریع لایه خارجی، اکسیداسیون با نفوذ اکسیژن از لایه هماتیته تشکیل شده کنترل می‌گردد.

زمان مورد نیاز برای اکسیداسیون به فشار اکسیژن که عامل محرک نفوذ است، وابستگی زیادی دارد. نشان داده شده است که زمان مورد نیاز برای رسیدن به مقدار مشخصی از اکسیداسیون، با مربع قطر گندله رابطه مستقیم دارد، به طوری که اگر اندازه قطر گندله‌ای دو برابر شود زمان مورد نیاز برای رسیدن به درجه اکسیداسیون مشخص، چهار برابر حالت قبل می‌گردد [۴].

ژو^۱ و همکارانش [۵] به منظور بررسی تاثیر مقدار خردایش بر اکسیداسیون و استحکام گندله بر روی یک نوع کنسانتره با ۲ روش خردایش متفاوت مطالعاتی انجام دادند. در این مطالعات گندله خام با استفاده از دیسک گندله ساز آزمایشگاهی بدست آمد. گندله‌ها در دمای 200°C به مدت ۴ ساعت خشک شدند، مرحله پیشگرم، پخت و سرد کردن در مناطق مختلف کوره تیوبی انجام شد. مرحله پیشگرم در دماهای بین ۹۵۰-۶۵۰ و در زمان‌های بین ۸ تا ۱۷ دقیقه انجام شد. با انجام محاسبات ریاضی مقدار انرژی فعال سازی برای میزان خردایش کمتر $49/62 \text{ KJ/mol}$ و برای خردایش بیشتر $33/84 \text{ KJ/mol}$ بدست آوردند. علت کم شدن مقدار انرژی فعال سازی برای خردایش بیشتر انجام فعال سازی مکانوشیمیایی در خردایش بیشتر می‌توان دانست.

در تحقیق حاضر، برای مطالعه متغیرها و بهینه سازی فرآیند به جای روش متداول اجرای آزمایش‌ها، از روش طراحی آزمایش استفاده شده‌است. روش طراحی آزمایش مورد استفاده، طرح عاملی کامل می‌باشد. در این روش پس از انجام یک سری آزمایش‌های معین، یک رابطه ریاضی بین متغیرهای فرآیند و متغیر پاسخ بدست می‌آید. در این تحقیق، تاثیر پارامتر زمان و دما در مرحله پیشگرم بر روی اکسیداسیون بررسی شده است.

۲- روش تحقیق

اندازه و توزیع ذرات کنسانتره تاثیر بسزایی در خواص گندله خام و پخته و به خصوص در گندله شدن دارد. برای تامین توزیع و اندازه ذرات مناسب، با استفاده از تجربه شرکت گل گهر سیرجان نسبت ۱۵ درصد از کنسانتره نوع ۲ و ۸۵ درصد از کنسانتره نوع ۱ که ویژگی‌های آن‌ها در جدول (۱) آمده‌است، با هم مخلوط می‌شوند. سپس برای ساخت گندله خام مواد مورد نیاز که عبارتند از کنسانتره مخلوط شده، بنتونیت و آب با هم به خوبی در جارمیل به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط می‌شوند. نسبت مواد ۱ درصد وزنی بنتونیت، ۸ درصد وزنی آب و ۹۱ درصد وزنی از کنسانتره مخلوط شده می‌باشد. پس از مخلوط شدن به قدر کافی، مواد به آرامی وارد دیسک گندله ساز می‌شود و با اسپری آب در محل تغذیه مواد به دیسک، گندله خام بدست می‌آید. ابعاد گندله بر خواص مورد مطالعه تاثیر گذار می‌باشد. اندازه بهینه گندله‌های مناسب برای احیاء مستقیم بین ۹ تا ۱۲ میلیمتر است [۴ و ۱]، به همین دلیل زمانی که گندله‌ها به ابعاد ۹-۱۲ میلیمتر رسیدند، از دیسک خارج می‌شوند.

¹ ZHU

خشک کردن در کوره الکتریکی (ATBIN) در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۰ دقیقه انجام می‌گیرد تا رطوبت به طور کامل حذف شود و در مرحله پیشگرم به دلیل افزایش ناگهانی دما، خروج سریع رطوبت باعث بروز ترک در گندله نگردد. بعد از خشک شدن، مرحله پیشگرم در کوره تیوبی با قطر ۴/۵ سانتیمتر انجام می‌گیرد. گندله‌های خام در بوته آلومینایی قرار می‌گیرند و پس از به دما رسیدن کوره تحت دمش هوا توسط دمنده (از همان ابتدای قرار گرفتن) در مرکز کوره قرار می‌گیرد و پس از زمان مورد نظر از کوره بیرون آورده می‌شود. بعد از خنک شدن در هوا گندله تحت آنالیز اشباع مغناطیسی به منظور اندازه گیری مقدار مگنتیت باقی مانده می‌گیرد. بازده تبدیل مگنتیت به هماتیت که نشان دهنده میزان اکسیدشدن نمونه است از رابطه زیر بدست می‌آید:

جدول ۱- ترکیب شیمیایی کنسانتره مگنتیتی حاصل از آنالیز XRF

کانه	Blaine No.	درصد زیر ۴۵ میکرومتر	%Fe	%FeO	%P	%S	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%CaO	%MgO
۱	۲۱۰۰	۸۵	۶۶/۳۸	۲۶/۱۳	۰/۰۴۳	۰/۸۷۲	۱/۹۴	۰/۳۸۶	۰/۵۶	۲/۴۱
۲	۱۴۰۰	۶۵	۶۷/۵۵	۲۵/۱۶	۰/۰۲۲	۰/۵۹۲	۱/۳۲	۰/۲۴۵	۰/۳۲	۱/۳۵

مقدار مگنتیت نمونه - مقدار مگنتیت اولیه

$$R = \frac{\text{مقدار مگنتیت اولیه}}{\text{مقدار مگنتیت نمونه}} \times 100 \quad (۲)$$

مقدار مگنتیت اولیه

در این پژوهش، برای هر کدام از متغیرها ۴ سطح وجود دارد. طرح عاملی کامل برای دو متغیر در ۴ سطح با تعداد ۴^۲ آزمایش قابل استفاده است. جدول (۲) مقادیر سطوح هر کدام از متغیرها برای هر آزمایش را نشان می‌دهد. پس از انجام آزمایش‌های شرح داده شده نتایج حاصل به دقت ثبت و محاسبات اولیه بر روی داده‌ها توسط نرم افزار Minitab، نسخه ۱۶ انجام شده است.

جدول ۲- پارامترهای آزمایش

	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
دمای پیشگرم (درجه سانتیگراد)	۷۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰
زمان پیشگرم (دقیقه)	۷	۱۵	۲۳	۳۱

۳- نتایج و بحث

بازده اکسایش مگنتیت به هماتیت هم که از روی مقدار مگنتیت باقیمانده بر اساس رابطه (۱-۲) محاسبه می‌شود، در جدول (۳) گزارش شده است.

جدول ۳- جدول آزمایشات تهیه شده به کمک نرم افزار مینیتب ورژن ۱۶

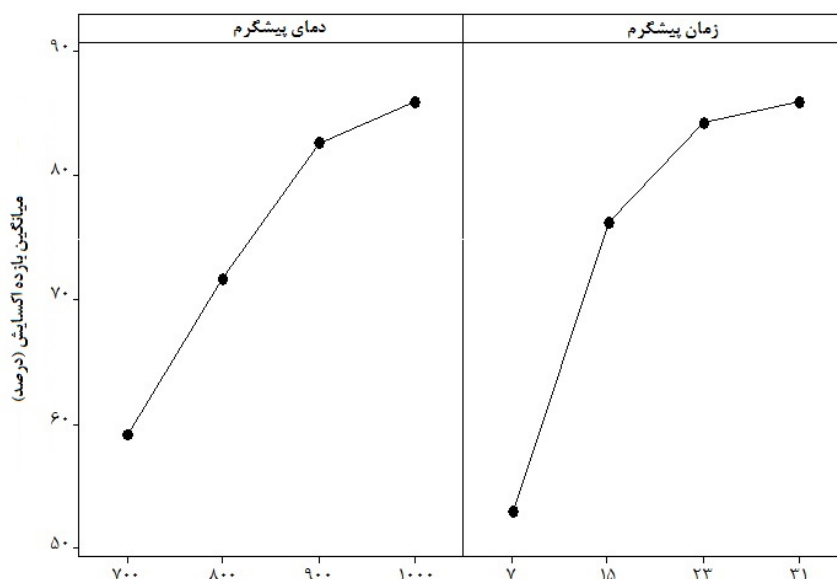
شماره آزمایش	دمای پیشگرم (سانتیگراد)	زمان پیشگرم (min)	مقدار مگنتیت باقیمانده (%)	بازده اکسیداسیون (%)
۱	۷۰۰	۷	۴۷/۱	۳۹/۸۰۷
۲	۷۰۰	۱۵	۳۱/۹	۵۹/۰۲۱
۳	۷۰۰	۲۳	۲۵/۵	۶۷/۱۷۱
۴	۷۰۰	۳۱	۲۲/۸	۷۰/۶۱۹
۵	۸۰۰	۷	۴۰/۹	۴۷/۶۲۰
۶	۸۰۰	۱۵	۲۱/۵	۷۲/۲۸۲
۷	۸۰۰	۲۳	۱۳/۸	۸۲/۴۱۹
۸	۸۰۰	۳۱	۱۲/۰	۸۴/۴۷۹
۹	۹۰۰	۷	۳۰/۳	۶۱/۰۵۵
۱۰	۹۰۰	۱۵	۱۱/۴	۸۵/۲۵۲
۱۱	۹۰۰	۲۳	۶/۴	۹۱/۷۰۶
۱۲	۹۰۰	۳۱	۵/۹	۹۲/۳۵۳
۱۳	۱۰۰۰	۷	۲۸/۲	۶۳/۷۲۸
۱۴	۱۰۰۰	۱۵	۹/۱	۸۸/۱۵۴
۱۵	۱۰۰۰	۲۳	۳/۴	۹۵/۵۸۹
۱۶	۱۰۰۰	۳۱	۳/۱	۹۵/۹۷۸

۳-۱- بررسی اثرات اصلی^۱

تغییرات مقدار مگنتیت باقیمانده نشان دهنده میزان انجام شدن اکسیداسیون می باشد. اگر تغییرات مقدار مگنتیت باقیمانده زیاد باشد، آنگاه مقدار اکسیداسیون نیز زیاد می باشد و بالعکس. بررسی دما و زمان به طور کلی برای بازده اکسایش به منظور مطالعه اکسیداسیون مگنتیت به هماتیت از طریق نمودارهای زمان- بازده اکسایش و دما- بازده اکسایش امکان پذیر است. شکل (۱) تاثیر اصلی دما و زمان آزمایش بر بازده اکسایش را نشان می دهد.

همان طور که از نمودار دمای پیشگرم- بازده اکسایش دریافت می شود، در فاصله دمایی ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد شیب نمودار نسبت به فاصله ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بسیار بیشتر است که نشان دهنده آهنگ بیشتر اکسیداسیون می باشد. با افزایش دما مقدار اکسیداسیون انجام شده نسبت به دمای پایین تر بیشتر می شود، اما با زیادتیر شدن دما مقدار افزایش در تغییرات اکسیداسیون کمتر می شود.

^۱ Main Effect



شکل ۱- تاثیر اصلی دما و زمان پیشگرم بر بازده اکسایش

با دقت در نمودار زمان- بازده اکسایش می‌توان دریافت که بیشتر اکسیداسیون در زمان‌های اولیه و تا حدود ۲۳ دقیقه اتفاق می‌افتد. با گذشت زمان سرعت اکسیداسیون انجام گرفته کمتر می‌شود که علت آن را می‌توان کم شدن مقدار مگنتیت باقیمانده عنوان کرد. از طرف دیگر، با گذشت زمان با بیشتر شدن اکسیداسیون، مقدار محصول (هماتیت) در سطح و اطراف مرکز مگنتیت باقیمانده افزایش می‌یابد و همین لایه هماتیتهی ایجادشده نفوذ اکسیژن به مرکز مگنتیتی را مشکل می‌کند. با توجه به مطالعات محققان، دمای زینتر شدن مگنتیت در حدود ۹۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد [۶]. در دماهای ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد دمای اولیه کوره به‌علاوه افزایش دمای حاصل از انجام واکنش گرمای اکسیداسیون می‌تواند باعث زینتر شدن مرکز مگنتیتی گندله شود و عبور گاز و نفوذ اکسیژن را با مشکل مواجه کند که این امر نرخ اکسیداسیون را کاهش می‌دهد [۶].

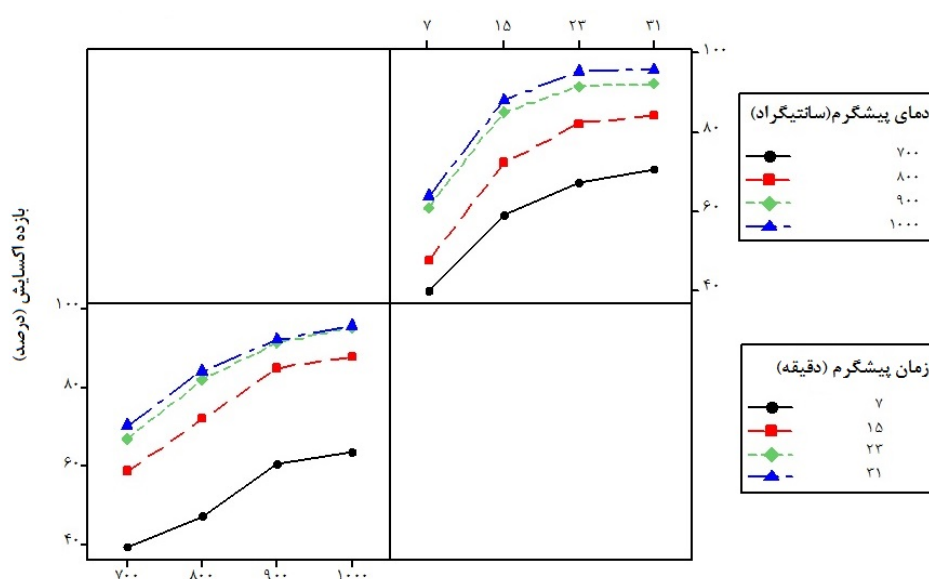
۳-۲- بررسی اثرات متقابل

بررسی اثر سطوح مختلف دما و زمان بر بازده اکسایش در مرحله پیشگرم از طریق نمودار اثرات متقابل که در شکل (۲) آمده، امکان پذیر می‌باشد.

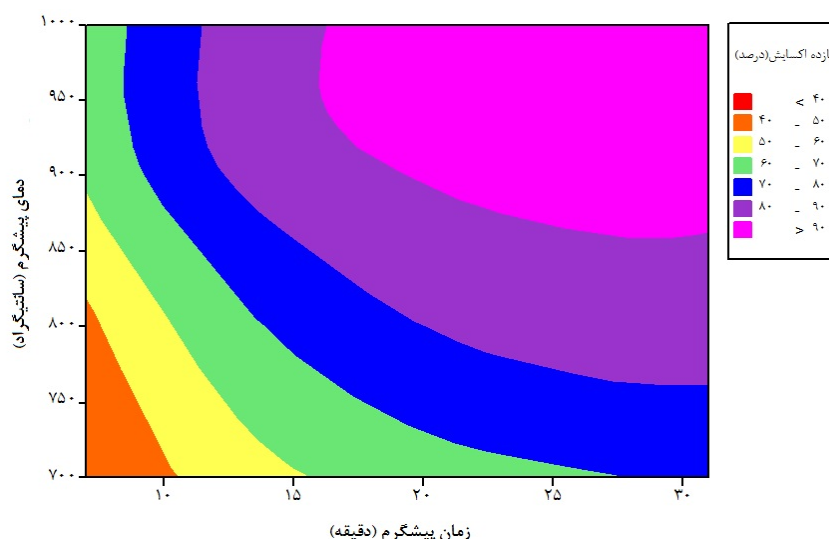
با در نظر گرفتن فاصله بین نمودارهای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد می‌توان اثر قابل ملاحظه دما در این محدوده بر افزایش نرخ اکسیداسیون را دریافت. اما فاصله نزدیک بین نمودارهای مربوط به دماهای ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، افزایش نرخ اکسیداسیون قابل اغماضی را نشان می‌دهد و این تایید می‌کند که پس از دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد واکنشی رخ می‌دهد که این واکنش همان سینتر شدن مگنتیت در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد است.

با در نظر گرفتن فاصله بین نمودارهای زمان بین ۷ تا ۲۳ دقیقه افزایش ناگهانی در مقدار اکسیداسیون مشاهده می‌شود ولی از زمان ۲۳ تا ۳۱ دقیقه، افزایش نرخ اکسیداسیون قابل گذشت است.

تاثیر همزمان دما و زمان پیشگرم بر بازده اکسایش در نمودار کنتور (Contour) شکل (۳) آمده است.



شکل ۲- نمودار اثر متقابل دما و زمان پیشگرم بر بازده اکسایش در مرحله پیشگرم



شکل ۳- تاثیر همزمان دما و زمان پیشگرم بر بازده اکسایش

از این گونه نمودارها می توان برای تعیین شرایط بهینه استفاده کرد. با توجه به مطالعات محققان برای جلوگیری از اثر دو لایه ای شدن، حداقل ۸۰ درصد اکسیداسیون در مرحله پیشگرم مناسب پیشنهاد شده است [۳،۱]. بازه ۸۰ تا ۹۰ درصد اکسیداسیون که در شکل (۳) نشان داده شده است. برای قرار گرفتن در این بازه، می توان دمای و زمان لازم برای مرحله پیشگرم را انتخاب کرد. دمای پیشگرم ۸۰۰ درجه سانتیگراد و زمان پیشگرم ۲۰ دقیقه به عنوان مقادیر بهینه در این مرحله انتخاب می شود.

۳-۳- مدلسازی طرح و فرمول بندی

حال سعی می شود تا نتایج حاصل به صورت یک مدل ریاضی با توانایی پیش بینی نتایج تجربی بیان شود. سپس برای دانستن

این که مدل ریاضی پیشنهادی برای داده‌های این تحقیق مناسب می‌باشد، از معیارهای مختلف آماری استفاده می‌شود. چندین معیار آماری برای بیان میزان مناسب بودن مدل ریاضی وجود دارد که عبارتند از: P-value سطح معنی داری، ضریب همبستگی چندگانه برای مدل ریاضی (R^2) و ضریب همبستگی چندگانه تعدیل شده برای جمله‌های مدل (R^2_{adj}). پس از بررسی کلی داده‌ها توسط نرم افزار با آزمون مرحله‌ای مدل‌ها از طریق معیارهای آماری، مشخص شد که استفاده از یک مدل درجه دو برای بازده اکسایش لازم است.

حال باید به ارزیابی مدل و مشخص کردن میزان اهمیت جمله‌های موجود در مدل پرداخته شود. با ابزار آنالیز واریانس (ANOVA) می‌توان به تحلیل تاثیر تک تک جمله‌های مدل ریاضی درجه یک پرداخت و از میان آن‌ها جمله‌هایی که تاثیر آن‌ها از نظر آماری معنی دار می‌باشد را انتخاب نمود. به عبارت دیگر آنالیز واریانس روشی است که مشخص می‌کند آیا تاثیر مشاهده شده به اندازه کافی بزرگتر از خطای آزمایش است یا خیر. جدول (۴) داده‌های آنالیز واریانس برای بازده اکسایش مگنتیت به هماتیت را نشان می‌دهد.

مقدار 0.0001 برای P-value از نظر آماری به این معنی است که تنها 0.01% احتمال این وجود دارد که یک جمله فقط به علت وجود اغتشاش (noise) در نتایج تجربی، معنی دار انگاشته شده باشد. جمله‌هایی که مقدار P-value آن‌ها کوچکتر از 0.05 محاسبه شده است به عنوان جمله‌های با تاثیر معنی‌دار انتخاب شده و وارد مدل ریاضی خواهند شد در حالی که جمله‌های دیگر در مدل ریاضی وارد نخواهند شد [۷]. با توجه به مقادیر P-value موجود در جدول (۴) جملات دمای پیشگرم و زمان پیشگرم در مدل ریاضی مربوط به بازده اکسایش وارد خواهند شد، در حالی که جمله مربوط به تاثیر متقابل ($T \times t$) منظور نمی‌شود.

جدول ۴- آنالیز واریانس برای بازده اکسایش مگنتیت به هماتیت در مرحله پیشگرم

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value
دمای پیشگرم (T)	۱۶۵۶/۷۳	۱	۱۶۵۶/۷۳	۲۶/۸۵	۰/۰۰۰۴۱۲
زمان پیشگرم (t)	۲۲۶۶/۶۷	۱	۲۲۶۶/۶۷	۶۵/۱۳	۰/۰۰۰۰۱۱
R^2	۸۶/۰۲	۱	۸۶/۰۲	۱۷/۸۳	۰/۰۰۱۷۶۵
t^2	۴۶۱/۷۶	۱	۴۶۱/۷۶	۹۵/۶۹	۰/۰۰۰۰۰۲
$T \times t$	۰/۲۳	۱	۰/۲۳	۰/۴۷	۰/۸۳۲۰۲۶
خطا	۴۸/۲۶	۱۰	۴۸/۲۶	-	-
کل تصحیح	۴۵۱۹/۶۷	۱۵	-	-	-
			$R^2 = 98/93\%$		
			$R^2_{adj} = 98/40\%$		

پس از حذف جمله مربوط به تاثیر متقابل ($T \times t$)، لازم است با استفاده از داده‌های جدول نتایج و با استفاده از روابط مربوط، رگرسیون تمامی ضرایب برای مدل ریاضی محاسبه شود.

پس از انتخاب مدل درجه دو برای بازده اکسایش، لازم است با استفاده از داده‌های جدول نتایج و با استفاده از روابط مربوط، رگرسیون تمامی ضرایب برای مدل ریاضی محاسبه شود.

جدول ۵- ضرایب بدست آمده از محاسبه رگرسیون

ضریب	عامل پیش بینی کننده
۳۷/۵۱۷۷	ثابت
-۲/۳۱۸۷	T^2
۱۶/۰۵۸	T
-۵/۳۷۲	t^2
۲۶/۷۶۲	t
$R^2=98/93\%$	$R^2_{adj}=98/54\%$

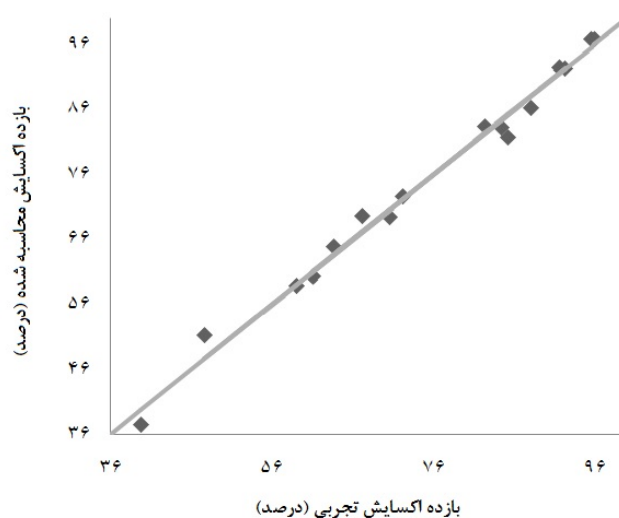
$$R = 37/5177 - 2/3187 T^2 + 16/058 T - 5/372 t^2 + 26/762 t \quad (3)$$

$$X_i = \frac{X_i - X_{i,0}}{\Delta X} \quad (4)$$

در رابطه فوق مقادیر کد شده دمای پیشگرم و زمان پیشگرم وارد می شود، تا بازده اکسایش بر حسب درصد بدست می آید. در طراحی آزمایش، معمول این است که سطوح متغیرها را با مقدار واقعی آن نشان نمی دهند. بلکه برای سهولت محاسبات آماری و کد نویسی کامپیوتری مقادیر واقعی را به مقادیر کد شده مانند ۰، +۱، +۲، +۳ تبدیل می کنند. رابطه زیر مقادیر واقعی متغیرها را به مقادیر کد شده مرتبط می سازد [۷-۹].

X_i مقدار کد شده مجهول برای متغیر i و X_i مقدار واقعی در آن سطح است. $X_{i,0}$ مقدار واقعی در سطح صفر است که به عنوان نقطه مبدأ استفاده می شود و ΔX گام تغییرات سطوح است.

همان طور که مشاهده شکل (۴) نشان می دهد، بازده اکسایش به دست آمده از آزمایش های تجربی به مقادیر محاسبه شده توسط مدل بسیار به هم نزدیک هستند و به این ترتیب درستی و کارآمدی مدل در عمل نیز اثبات می گردد.



شکل ۴- مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش های تجربی با مقادیر محاسبه شده توسط مدل

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر دما و زمان پیشگرم بر اکسیداسیون مگنتیت به هماتیت بررسی شد. برای هر کدام از متغیرها ۴ سطح وجود دارد. طرح عاملی کامل برای دو متغیر در ۴ سطح با تعداد ۱۶ آزمایش انجام شد. پس از انتخاب مدل درجه دو برای بازده اکسایش، با استفاده از داده‌های و روابط مربوط، رگرسیون تمامی ضرایب برای مدل ریاضی محاسبه شد. نتایج زیر پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل آن‌ها بدست آمد.

۱- با افزایش دما مقدار اکسیداسیون انجام شده نسبت به دمای پایین تر بیشتر می‌شود، اما با بیشتر شدن دما مقدار افزایش در تغییرات اکسیداسیون کمتر می‌شود.

۲- با گذشت زمان سرعت اکسیداسیون انجام گرفته کمتر می‌شود که علت آن را می‌توان کم شدن مقدار مگنتیت باقیمانده عنوان کرد. از طرف دیگر، با گذشت زمان با بیشتر شدن اکسیداسیون، مقدار محصول (هماتیت) در سطح و اطراف مرکز مگنتیت باقیمانده افزایش می‌یابد و همین لایه هماتیته ایجاد شده نفوذ اکسیژن به مرکز مگنتیتی را مشکل می‌کند.

۳- در فاصله دمایی ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد شیب نمودار بازده اکسایش نسبت به دماهای ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بیشتر است که این خود نشان دهنده آهنگ بیشتر اکسیداسیون می‌باشد. در دماهای ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد دمای کوره از یک طرف و افزایش دمای حاصل از انجام واکنش گرمای اکسیداسیون باعث سینتر شدن مرکز مگنتیتی گندله می‌شود، از آنجا که عبور گاز و نفوذ اکسیژن با مشکل روبرو می‌شود، شیب نمودار اکسیداسیون کاهش می‌یابد.

۴- رابطه زیر برای بازده اکسایش بر حسب پارامترهای دمای پیشگرم و زمان پیشگرم بدست آمده است:

$$R = 37/5177 - 2/3187 T^2 + 16/058 T - 5/372 t^2 + 26/762 t$$

۵- دمای پیشگرم ۸۰۰ درجه سانتیگراد و زمان پیشگرم ۲۰ دقیقه به عنوان مقادیر بهینه در این مرحله انتخاب می‌شود.

مراجع

- [۱] آماده سازی بار کوره های تولید آهن و فولاد: ناصر توحیدی، رامز وقار، ۱۳۷۶، انتشارات دانشگاه تهران.
- [2] H. Lepp, "Stages in the oxidation of magnetite", The American Mineralogist, 1957, Vol. 42, pp 679-681.
- [3] D. Papanastassiou, and G. Bitsianes, "Mechanisms and Kinetics Underlying the Oxidation of Magnetite in the Induration of Iron Ore Pellets", Metallurgical Transactions, 1973, Vol. 4, pp 487-496.
- [4] U. Devi, S. M. Rao, and M. Ranjan, "Influence of Pellet Size on Quality and Microstructure of Iron Ore Pellets", ISIJ International, 2008, Vol. 48, pp 768-776.
- [5] D. Zhu, J. Pan, C. Wang, Y. Guo, T. Jiang, and C. Hu, "Improving the Oxidizing Kinetics of

- Pelletization of Magnetite Concentrate by High Press Roll Grinding", ISIJ International, 2003, Vol. 44, pp 69-73.
- [6] S. Forsmo, P. O. Samskog, and B. M. T. Björkman, "Mechanisms in oxidation and sintering of magnetite iron ore green pellets", Powder Technology, 2008, Vol. 183, pp 247-259.
- [7] D. C. Montgomery, "Design And Analysis Of Experiments", John Wiley & Sons Inc., 5th Edition, 2001.
- [8] A. I. Levin, "Design of Experiments in Chemical Engineering", John Wiley & Sons Inc., 2004.
- [9] NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. www.itl.nist.gov/div898/handbook. [Online].