

روند افزایش دمای بستر کربنی در یک سیستم تولید فلز تحت امواج مایکروویو

کیانوش شجاع، بهنام خوش اندام*

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده: شرکت‌های داخلی تولید کننده فلزات برای تامین انرژی مورد نیاز فرآیندی با مشکلات بسیار زیادی رو به رو هستند. این شرکت‌ها اغلب از کوره‌های صنعتی گازی استفاده می‌کنند که علاوه بر مصرف انرژی بسیار بالا، تاثیر بسیار منفی بر محیط زیست دارند. به همین دلیل، پیشنهاد فرآیندهای مدرن برای احیای اکسید فلزات به منظور کاهش مصرف انرژی بسیار مورد توجه خواهد بود. در این پژوهش، بستر کربنی یک سیستم احیا کننده اکسیدهای فلزی جدید تحت امواج مایکروویو مدل‌سازی شده است. در این سیستم، بستر کربنی وظیفه گرمادهی را بر عهده داشته و امواج الکترومغناطیسی را به گرما تبدیل می‌کند. با توجه به اینکه گرانول‌های اکسیدهای فلزی در این سیستم در درون بستر کربنی قرار گرفته و بستر کربنی تقریباً تمام امواج الکترومغناطیسی را جذب می‌کند، از اثرات گرمایشی اکسیدهای فلزی صرف نظر شد. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با داده‌های تجربی مرتبط با دمای بستر کربنی نشان داد که مدل مورد استفاده دارای دقت مناسبی بوده و میانگین خطا کمتر از ۵ درصد است. بر اساس مدل‌سازی انجام شده مشخص شد که با افزایش توان مایکروویو از ۱۰۰۰ وات به ۱۲۰۰ وات میزان دمای بستر کربنی (بدون در نظر گرفتن گرانول‌های اکسیدهای فلزی) به اندازه ۹ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، مشخص شد که سیلیسیم کاربرد به عنوان جاذب امواج مایکروویو از نظر نرخ تولید حرارت از کربن فعال مورد استفاده عملکرد بهتری داشت. همچنین، نتایج نشان داد با افزایش پارامتر قابلیت انتشار بستر کربنی میزان حداکثر دمای حاصله کاهش می‌یابد. همچنین، با تغییر پارامتر قابلیت انتشار از ۰/۹۵ به ۰/۶۵ میزان دمای نهایی بستر پس از ۱۵ دقیقه ۹ درصد افزایش یافت.

واژگان کلیدی: امواج مایکروویو، جاذب امواج مایکروویو، سیستم مدرن حرارت دهی، اکسیدهای فلزی

Microwaves, Microwave Wave receptor, Modern Heating System, Metal Oxides **KEYWORDS:**

مقدمه

[۱]. به همین دلیل، پیشنهاد فرآیندهای مدرن برای احیای اکسید فلزات به منظور کاهش مصرف انرژی بسیار مورد توجه خواهد بود. استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی دلیل اصلی افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای است که سبب بروز مشکلات فراوانی برای

امروزه شرکت‌های تولید کننده فلزات با هزینه‌های بسیار زیادی برای تامین انرژی روبه‌رو هستند. این شرکت‌ها اغلب از کوره‌های صنعتی گازی و فرآیند ریفورمینگ گاز متان استفاده می‌کنند که علاوه بر مصرف انرژی بسیار بالا تاثیر بسیار منفی بر محیط زیست دارند

*Email: bkhoshandam@semnan.ac.ir

* عهده‌دار مکاتبات

- انرژی اکتیواسیون برای دو مرحله واکنشی اکسید آهن ۸۹/۱۳ و ۷۰/۴۱۲ کیلوژول بر مول گزارش شده است. توکاوچ و همکاران [۱۰] سینتیک‌های کاهش اکسید کبالت (III) را با گاز احیا کننده هیدروژن بررسی کرده‌اند. فرآیند کاهش با نرخ‌های حرارتی مختلف انجام شده است. نشتایی و خوش‌اند/ام [۱۱] واکنش غیرکاتالیستی گاز احیا کننده با قرص‌های (که با فشرده‌سازی ذرات پودر جامد ساخته شده است) موجود در یک بستر پر شده کروی را به صورت ریاضی مدلسازی کرده‌اند. مون و همکاران [۱۲] رفتار کاهشی اکسید آهن (I) با ترکیبات مختلف هیدروژن و کربن‌مونوکسید را در دمایی بین ۱۰۷۳ تا ۱۲۲۳ کلین بررسی کرده و تخلخل، توزیع اندازه ذرات و مساحت سطح اکسید آهن را در نظر گرفته‌اند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که در تمام محدوده‌ها، نرخ احیای اکسید فلزی با افزایش محتوای کربن‌مونوکسید در ترکیب گازی کاهش می‌یابد. کاهش اکسید آهن دو و سه ظرفیتی به آهن با گاز سنتز در پژوهش‌های مختلفی انجام شده و گاز سنتز به عنوان یک ترکیب احیا کننده قوی شناخته شد. مشخص شد که هیدروژن بیشتر در ترکیب گاز سنتز سبب احیای بهتر اکسیدهای فلزی خواهد شد [۱۳-۱۵]. شجاع و خوش‌اند/ام [۱۶]، یک سیستم پیرولیز گلیسیرین را با استفاده از دستگاه اسپری پیشنهاد کردند. گازهای حاصل از پیرولیز گلیسیرین که سبب تولید گاز سنتز شد، بلافاصله برای احیای اکسیدهای آهن و کبالت استفاده شدند. انرژی لازم برای این فرآیند، با اتلاف جریان الکترومغناطیسی توسط بستر کربن فعال بدست آمد. در پژوهش دیگری [۱۷] فرآیند مدلسازی سیستم با استفاده از یک رابطه نیمه تجربی انجام شد و مشخص شد که اکسیدهای فلزی تأثیری بر دمای بستر کربنی که تحت امواج مایکروویو قرار گرفته نداشت. در پژوهش [۱۸] ذکر شد که در مراجع به مسئله تولید آلیاژهای فلزی با اندازه ذرات همگون با روش احیای اکسیدهای فلزی خالص چندان پرداخته نشده است. این رویه به عنوان فرآیند سینترینگ-کاهش معرفی شده است. این روش را می‌توان به ویژه در تولید آلیاژ حاوی فلزات سخت-احیا بکار برد. در این پژوهش، برای کنترل دقیق شرایط فرآیندی و دستیابی به سینتیک واکنش از یک آنالیز حرارتی (TGA²) استفاده شد و نتایج مناسبی به همراه داشت. اسپرینر و همکاران^۳ [۱۹] فرآیند کاهش اکسید آهن را با استفاده از عامل احیای هیدروژن بررسی کردند. آن‌ها سینتیک کاهش و نقش

محیط زیست شده است. بیودیزل به دلیل تولید آلاینده‌های کمتر در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، به عنوان یک جایگزین مناسب برای این سوخت‌ها معرفی شده است [۲-۴]. تبادل استری^۱ چربی‌های حیوانی یا روغن‌های گیاهی به عنوان یک روش مناسب برای تولید گسترده بیودیزل مورد استفاده قرار گرفته است. گلیسیرین خام محصول اصلی فرآیند تبادل استری بوده و ۱۰ درصد وزنی از کل محصول را شامل می‌شود. با توجه به الزامات زیست محیطی و افزایش تقاضا برای تولید بیودیزل، تولید گلیسیرین به میزان چشمگیری افزایش یافته است [۲، ۳]. بنابراین، با توجه به روند فزاینده تولید بیودیزل‌ها، تولید گلیسیرین نیز به اجبار افزایش یافته و با توجه به مازاد بودن آن، با کاهش عرضه و قیمت همراه خواهد شد. بر این اساس، پیرولیز گلیسیرین به عنوان یک ماده خام و استفاده از گازهای حاصل از پیرولیز آن برای سنتز فلزات در مقایسه با هیدروژن، از نقطه نظر اقتصادی قابل توجه است. روش‌های دیگری نیز برای تولید گاز سنتز معرفی شده است [۵]. *ولیان‌بن* و همکاران [۶] فرآیند پیرولیز گلیسیرین را در یک راکتور لوله‌ای (بستر پر شده) تحت فشار اتمسفر و محدوده دمایی بین ۶۵۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس انجام دادند. آن‌ها از گاز نیتروژن به عنوان گاز حامل و از یک کوره الکتریکی برای رسیدن به دماهای مورد نظر استفاده کردند. *شهبیرا* و همکاران [۷]، تولید گاز سنتز را با استفاده از کاتالیست Ni/ α -Al₂O₃ با فرآیند پیرولیز گلیسیرین در دماهای مختلف (۹۷۳، ۱۰۲۳ و ۱۰۷۳ درجه کلین) مورد بررسی قرار دادند. پیرولیز کاتالیستی گلیسیرین سبب تولید گازهای هیدروژن، کربن‌مونوکسید، کربن‌دی‌اکسید و متان شد. در این پژوهش، نسبت هیدروژن به مونوکسید کربن کمتر از ۲ در نظر گرفته شد. *فرناندز* و همکاران [۸] فرآیند پیرولیز گلیسیرین را تحت امواج مایکروویو انجام دادند. آن‌ها در این تحقیق، از کربن فعال به عنوان بستر جاذب امواج مایکروویو استفاده کردند. در این پژوهش فرآیند پیرولیز توسط یک سرنگ انجام شده است. *هو* و همکاران [۹] پارامترهای سینتیک کاهش اکسید آهن با گاز احیاکننده هیدروژن را با استفاده از روش ایزوترمال در یک بستر پر شده بررسی و مکانیزم‌های کاهش Fe₃O₄ را توسط هیدروژن ارائه کردند. در این پژوهش، از هیدروژن به عنوان عامل احیا استفاده شد. احیای دو مرحله‌ای اکسید آهن به صورت زیر است:

- Fe₂O₃ در ابتدا به Fe₃O₄ و در ادامه نیز به آهن تبدیل شده است.

(۱) Transesterification

(۳) Spreitzer et al

(۲) Thermogravimetric analysis

سازد. در مرجع [۱۷] از یک رابطه نیمه تجربی استفاده شد تا روند افزایش دمای اکسیدهای آهن موجود در یک بستر کربنی تحت امواج مایکروویو بررسی شود. در کار حاضر از یک رابطه کاملاً تئوری (معادله (۱)) برای مدل‌سازی بستر کربن استفاده می‌شود. مهم‌ترین دلیل و هدف شبیه‌سازی و انجام این پژوهش تعیین اثر پارامترهای نسبت حجم به سطح و قابلیت انتشار بستر کربنی و مشاهده روند افزایش دمای بستر تحت اثر این عوامل می‌باشد. کلیه محاسبات و مدل‌سازی‌ها در این پژوهش با استفاده از نرم افزار متلب ورژن ۲۰۱۹ انجام گردید. بررسی این سه پارامتر به صورت آزمایشگاهی بسیار هزینه‌بر است. در ابتدا فرض شد که وجود مقادیر بسیار زیاد کربن در راکتور از جذب امواج مایکروویو توسط ذرات اکسید فلزات جلوگیری خواهد کرد. علاوه بر این، اثر تغییر توان مایکروویو، میزان پارامتر قابلیت انتشار بستر کربنی، تغییر جنس بستر و افزایش دمای اکسید آهن (II) خالص بررسی می‌شود. تعیین عوامل موثر بر روند افزایش دمای بستر می‌تواند به طراحی سیستم‌های نیمه صنعتی مبتنی بر گرمایش امواج مایکروویو موثرتر کمک کند. در ابتدا، نحوه مدل‌سازی ریاضی سیستم و پارامترهای مورد استفاده معرفی می‌شود. در ادامه، در مورد نتایج بدست آمده بحث خواهد شد و در پایان نیز نتیجه‌گیری پژوهش ارائه می‌شود.

مدل‌سازی

بستر مورد استفاده در راکتور شامل دو بخش کربن و گرانول‌های اکسید فلزات داخل آن است. علت اصلی افزایش دما در بستر وجود وجود کربن فعال به عنوان یک ماده دی الکتریک باشد. با این حال، در این پژوهش تاثیر وجود گرانول‌های اکسید آهن بر روند افزایش دمای بستر بررسی شد. پارامترهای مورد بررسی در مدل‌سازی به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- روند افزایش دمای بستر کربنی
- ۲- روند افزایش دمای گرانول‌های اکسید فلزی
- ۳- تاثیر توان مایکروویو بر روند افزایش دمای بستر
- ۴- تاثیر استفاده از سیلیسیم کاربید به جای کربن فعال
- ۵- تاثیر پارامتر قابلیت انتشار بر دمای نهایی بستر
- ۶- تاثیر نسبت سطح به حجم بستر

شکل ۱ نحوه قرارگیری گرانول‌های اکسید آهن (II) را درون بستر کربنی نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، امواج مایکروویو

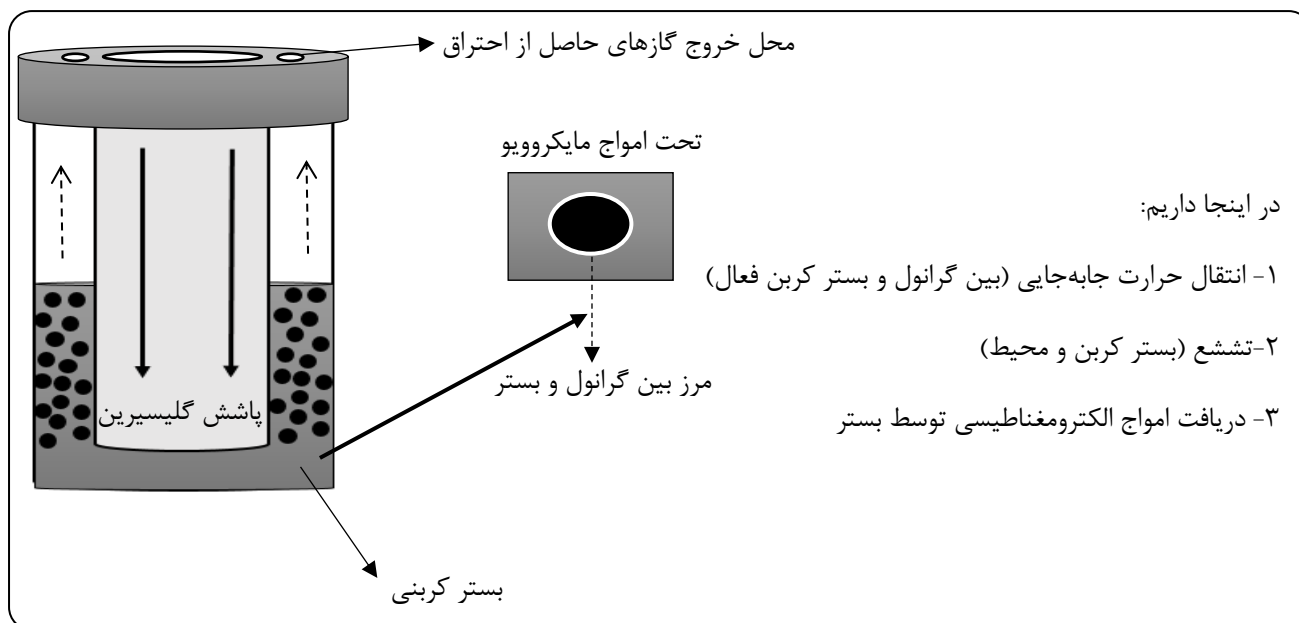
انرژی فعال‌سازی را در فرآیند کاهش بررسی کردند. مشخص شد که افزایش دمای بستر تاثیر مستقیم بر سنتیک واکنش اکسید آهن دارد. جایگزین کردن ترکیبات پاک به جای کربن برای انجام فرآیند کاهش اکسید آهن یک گام موثر شناخته شد. کاهش اکسیدهای آهن با استفاده از فرآیند کاهش ذوب پلاسمای هیدروژن به عنوان جایگزینی برای رویکردهای قدیمی ساخت فولاد بررسی شد. صفت‌جانی و همکاران [۲۰] تشکیل فاز سرباره را در طول فرآیند کاهش اکسیدهای آهن بررسی کردند. مشخص شد که در ابتدای فرآیند کاهش، میزان استفاده از هیدروژن حداکثر بوده و در طول فرآیند کاهش می‌یابد. همچنین، استفاده از سرباره با خاصیت بنیانی^۱ ۲/۳ مناسب شناخته شد. ایپلی و همکاران [۲۱] از فرآیند کاهش الکتروشیمیایی واسطه‌ای^۲ برای تعیین مستقیم میزان و سرعت کاهش فری هیدریت، گوتیت^۳ و هماتیت^۴ استفاده کردند. مشخص شد که استفاده از این فرآیند برای ثبت تغییرات در کاهش اکسید آهن در طول تبدیل فاز مناسب شناخته شد. نجمی و همکاران [۲۲] از مواد کربن‌دار برای کاهش اکسید آهن در دمای ۱۵۵۰ درجه سلسیوس استفاده کردند. در این پژوهش، اکسید آهن با این ماده بدست آمده از پوسته کک و نخل ترکیب شده و تحت دما قرار گرفت. مشخص شد که واکنش کاهش به صورت گام به گام انجام شد و کیفیت مناسب این عامل کاهنده اثبات شد. سیستم‌های قدیمی کاهش اکسیدفلزات از نقطه نظر آلاینده‌گی و بازدهی پایین مورد نقد محققین قرار گرفته‌اند [۲۲]. کوره‌های الکتریکی و گازی در فرآیند احیای اکسیدهای فلزی به انرژی بسیار بالایی نیاز دارند و زمان انجام فرآیند نیز در این سیستم‌ها بسیار طولانی است [۱۲]. بنابراین، ساخت و بهینه‌سازی سیستم‌های جدید در جهت احیای اکسیدهای فلزی برای کاهش هزینه‌های مرتبط با مصرف انرژی و کاهش زمان انجام فرآیند بسیار قابل توجه است. استفاده از دستگاه مایکروویو برای گرمایش و تولید حرارت تا دمایی نزدیک به ۹۰۰ درجه سلسیوس یک راه حل بسیار موثر تلقی می‌شود. دستگاه مایکروویو دارای شیب دمایی بسیار بالا نسبت به زمان است و گرمای مورد نیاز برای انجام واکنش تنها در چند دقیقه تامین می‌شود. با این حال، آزمایش‌های اولیه برای بررسی عملکرد جاذب‌های امواج مایکروویو هزینه‌بر بوده و مدل‌سازی کامل سیستم می‌تواند بسیاری از این هزینه‌ها را کاهش داده و بررسی عوامل دخیل بر گرمایش سیستم و واکنش‌های کاهش و پیرولیز را آسان

(۱) Basicity

(۳) Goethite

(۲) Mediated electrochemical reduction

(۴) Hematite



شکل ۱- نحوه قرارگیری گرانول‌های اکسید آهن/اکسید کبالت درون بستر کربن

مایکروویو، عمق نفوذ فلزات یا اکسیدهای فلز یک پارامتر مهم است و نشان دهنده افت توان در برهم کنش مایکروویو و اکسید فلزات تلقی می‌شود. جزء مماسی میدان مغناطیسی (Ht) می‌تواند یک میدان الکتریکی (E) را بر روی سطوح پودر فلز یا اکسید فلز القا کند. در پودر اکسید فلز یا فلز، این میدان الکتریکی باعث ایجاد جریان سطحی و گرمایش مقاومتی ژول می‌شود. با در نظر گرفتن پودرهای فلزی یا اکسیدهای فلزی به صورت کروی، توان الکترومغناطیسی وارد شده بر روی سطحی به مساحت ۱ متر مربع به صورت زیر تعریف شده است [۲۳]:

$$P = \frac{6R_s |E_0|^2}{\eta_0^2} \quad (2)$$

در این رابطه، E_0 بزرگی میدان الکتریکی در سطح، η_0 امپدانس فضای آزاد برابر با ۳۷۷ اهم، r_s شعاع گرانول اکسید آهن، δ عمق نفوذ (رابطه) و R_s پارامتر اصلاح سطحی است.

چگالی توان الکترومغناطیسی ($PEPD$) برای سطحی به شعاع مشخص، به صورت زیر معرفی می‌شود [۲۳]:

$$P_{EMD} = \frac{6R_s |E_0|^2}{\eta_0^2 \cdot r_s} \quad (3)$$

در این رابطه، E_0 بزرگی میدان الکتریکی در سطح، η_0 امپدانس فضای آزاد برابر با ۳۷۷ اهم، r_s شعاع گرانول اکسید آهن، δ عمق نفوذ (رابطه) و R_s پارامتر اصلاح سطحی است [۱۷].

$$\delta = 0.029 \sqrt{\rho \lambda_0} \quad (4)$$

می‌تواند توسط بستر کربنی و همچنین گرانول‌های اکسید فلزات جذب شود. علاوه بر این، به سبب وجود جریان گاز آرگون (گاز حامل) و هوای اطراف راکتور، انتقال حرارت به صورت جابه‌جایی می‌باشد.

امواج مایکروویو به یک ماده دی‌الکتریک نفوذ کرده و از آن عبور می‌کند (مانند کربن فعال). نفوذ امواج سبب ایجاد یک میدان مغناطیسی در یک حجم ویژه شده که همین مورد سبب القای پلاریزاسیون و حرکت بارها می‌شود. مقاومت در برابر این حرکات ناشی از نیروهای داخلی، الاستیک و اصطکاکی باعث تضعیف میدان الکتریکی می‌شود. این تلفات منجر به گرمایش حجمی خواهد شد. توان الکترومغناطیسی جذب شده به ازای واحد حجم توسط مواد دی‌الکتریک (P_{EMD}) به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$P_{EMD} = 2\omega(\epsilon_0 \epsilon_r''(T)(E_{rms})^2 + \mu_0 \mu_r''(T)(H_{rms})^2) \quad (1)$$

در این رابطه ω فرکانس مایکروویو (2.45 GHz)، ϵ_0 ثابت گذردهی خلاء مطلق ($8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$)، ϵ_r'' ثابت دی‌الکتریک نسبی (بخش موهومی)، μ_0 تراوایی مغناطیسی مطلق فضای آزاد ($4\pi \times 10^{-7}$)، $\mu_r''(T)$ بخش موهومی ثابت تراوایی مغناطیسی نسبی است که به دما وابسته است، و E_{rms} و H_{rms} نیز ریشه میانگین مربع بزرگی میدان الکتریکی و مغناطیسی می‌باشد [۱۷].

فعل و انفعالات امواج مایکروویو با اکسیدهای فلزی یا فلزات تنها به سطوح آن‌ها وابسته است که توسط پارامتری به نام عمق نفوذ یا عمق پوسته (δ) توصیف می‌شود. در فرآیند گرمایش با

(چ): میزان ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای یک نرخ حدودی ثابت گاز حامل، $125 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ در نظر گرفته شد [۲۶].
 (د): با توجه به نبود داده‌های کافی برای اکسید کبالت و این واقعیت که اکسید فلزات خواص الکترومغناطیسی مشابهی دارند، گرانول تنها متشکل از اکسید آهن در نظر گرفته شد.
 بر اساس مفروضات ذکر شده، افزایش دما در گرانول‌های اکسید فلز و یا بستر کربنی تحت امواج مایکروویو را می‌توان با استفاده از رابطه زیر پیش بینی کرد [۲۵].

$$T_{n+1} = T_n + \Delta t / \rho c_p (P_{EMD} - P_{conv} - P_{rad}) \quad (۹)$$

در معادله (۹)، P_{EMD} ، P_{conv} و P_{rad} چگالی توان الکترومغناطیسی، افت توان در واحد حجم به سبب انتقال حرارت جابه‌جایی و توان تابشی را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} P_{conv}(n) &= (hA/V)(T_{n-1} - T_a) \\ P_{rad}(n) &= \delta \varepsilon A/V (T_{n-1}^4 - T_a^4) \end{aligned} \quad (۱۰)$$

در معادله (۱۰)، T_a دمای محیط، A سطح مقطع، V نسبت حجم و h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا را نشان می‌دهد. δ ثابت استفان - بولتزمن و ε تابش موثر پودر اکسید کبالت است. نحوه اندازه‌گیری Δt در پژوهش ذکر شده است [۲۵].

در معادله (۱۱) تابع خطای مورد استفاده در این پژوهش برای اندازه‌گیری میزان انحراف داده‌های محاسباتی در مقایسه با تعداد ۱۰ داده آزمایشگاهی ارائه گردید:

$$\% \text{ error} = \left(\sum_{10} \frac{\text{Experimental data} - \text{Predicted data}}{\text{Experimental data}} \right) \times 100 / 10 \quad (۱۱)$$

در جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی ارائه شد.

نتیجه‌ها و بحث

نمودار ۱ منحنی دما-زمان به دست آمده به صورت آزمایشگاهی [۱۷] و محاسباتی را برای بستر کربن فعال مورد استفاده نشان می‌دهد. محاسبه میزان افزایش دمای بستر کربنی بر اساس معادله (۱) و جایگذاری آن در معادله (۹) انجام شد. همانطور که مشاهده می‌شود، دمای بستر کربن در فرآیند گرمایش مایکروویو به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این راکتور مقدار کربن فعال به طور چشم‌گیری بیشتر از گرانول‌های اکسید آهن است و احتمال دریافت امواج مایکروویو توسط گرانول‌های اکسید آهن

$$R_s = 1 / \sigma \delta \quad (۵)$$

در روابط بالا، ρ مقاومت الکتریکی و طول موج صوتی برابر با $۱۲/۲۴$ سانتیمتر برای طول موج $۲/۴۵$ گیگاهرتز می‌باشد.

برای محاسبه بزرگی میدان الکتریکی در سطح (E_0) ، داریم [۲۴]:

$$\begin{aligned} I_{av} &= cU_{av} = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 E_{max}^2 \\ E_{max} &= E_0 \\ I_{av} &= \frac{P}{A} = 2I \end{aligned} \quad (۶)$$

در رابطه بالا P توان، A مساحت داخلی دستگاه مایکروویو که در اینجا با توجه به اینکه تمام امواج مایکروویو توسط بستر جذب می‌شود (خروجی امواج از درون مایکروویو بسیار محدود است) فرض بر آن است که برابر با مساحت بستر کربنی بوده، c سرعت نور و I چگالی میانگین یک موج الکترومغناطیسی می‌باشد. برای محاسبه مقادیر ریشه میانگین مربع میدان الکتریکی (E_{rms}) از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۴]:

$$E_{rms} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \quad (۷)$$

برای محاسبه حداکثر قدرت میدان مغناطیسی خواهیم داشت [۲۴]:

$$B_0 = \frac{E_0}{c}$$

و برای محاسبه مقادیر ریشه میانگین مربع میدان مغناطیسی (B_{rms}) از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۴]:

$$B_{rms} = \frac{E_{rms}}{\sqrt{2}} \quad (۸)$$

در این پژوهش، فرضیات ساده‌کننده زیر برای مدل‌سازی فرآیند گرمایش بستر کربنی و اکسیدهای فلزی تحت امواج مایکروویو در نظر گرفته شد [۲۵]:

(الف): برای در نظر گرفتن فرض حرارت دهی حجمی، ذرات گرانول به اندازه کافی کوچک هستند.

(ب): اثرات سینترینگ در طول فرآیند در نظر گرفته نمی‌شود.

(پ): همه ذرات اکسید کبالت در گرانول‌ها فشرده هستند و بدون در نظر گرفتن هدایت گرمایی ذرات پودر با نرخ ثابت گرم می‌شوند.

(ت): به دلیل این واقعیت که مقدار تانژانت اتلاف اکسیدهای فلزی پایین است، پارامتر عمق نفوذ برای ذرات اکسید فلزات تعریف می‌شود.

(ث): قابلیت انتشار^۱ با دما تغییر نمی‌کند.

(ج): برای در نظر گرفتن اثر رسانایی ذرات بستر کربن، انتقال حرارت از بستر کربن متناسب با اختلاف دمای آن‌ها در نظر گرفته شد.

(۱) Emissivity

همگن گرم می‌شود در حالی که مقداری هدایت گرمایی بین ذرات گرانول وجود خواهد داشت

- با توجه به دشواری اندازه‌گیری پارامترهای الکترومغناطیسی جاذب‌های امواج میکروویو به صورت آزمایشگاهی (مانند قابلیت انتشار)، پارامترهای ارائه شده در مراجع (جدول ۱) استفاده گردید که می‌تواند سبب افزایش خطای محاسبات شود.

- در ابتدا در زمان ۱ تا ۳ دقیقه میزان دمای آزمایشگاهی در مقایسه با دمای محاسباتی بیشتر بوده و پس از آن دمای محاسباتی مدام در حال افزایش است. علاوه بر دلایل ذکر شده، یکی دیگر از موارد بروز این خطا ثابت گرفتن پارامتر ثابت انتقال حرارت جابه‌جایی (h) نسبت به دما می‌باشد. همچنین، دماهای آزمایشگاهی نیز با استفاده از ترموکوپل نوع S اندازه‌گیری شده است که می‌تواند دلیل دیگری برای این خطای محاسباتی باشد چرا که استفاده از این نوع ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای داخل دستگاه میکروویو می‌تواند سبب دارای ایجاد خطایی به میزان ۳۰ درجه سلسیوس گردد.

در جدول ۲ کدهای متلب پایه مورد استفاده ملاحظه می‌شود. کلیه محاسبات انجام شده در این پژوهش با استفاده از تغییر پارامترهای کدهای قابل ملاحظه صورت گرفته است.

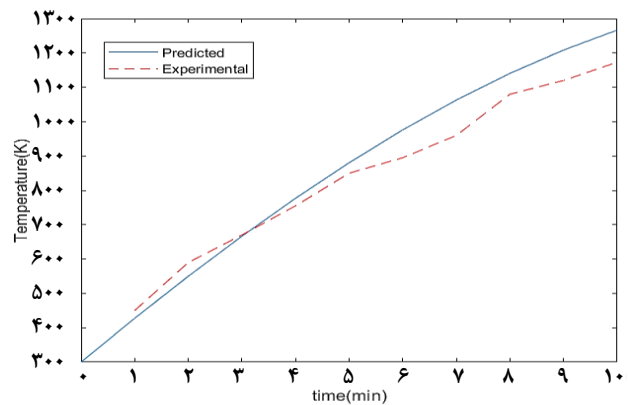
تأثیر توان میکروویو

نمودار ۲ دمای بستر کربنی را به صورت تابعی از زمان تابش امواج میکروویو برای چهار توان متفاوت ۱۲۰۰ وات، ۱۰۰۰ وات، ۸۰۰ وات و ۶۰۰ وات نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، افزایش توان میکروویو از ۱۰۰۰ وات به ۱۲۰۰ وات می‌تواند سبب افزایش بیشتر دمای بستر در یک زمان حرارت دهی ثابت شود.

با توجه به معادله (۶)، با افزایش توان میکروویو بزرگی میدان الکتریکی در سطح افزایش خواهد یافت. افزایش بزرگی میدان الکتریکی سبب می‌شود تا این میدان تأثیر بیشتری بر دو قطبی‌های لحظه‌ای و دو قطبی‌های پایدار موجود در ماده عایق داشته باشد. همچنین حرارت ایجاد شده به سبب افزایش اتلافات هدایتی سبب افزایش حرارت داخلی آن به صورت حجمی خواهد شد. با این حال، به سبب اتلافات تشعشع و جابه‌جایی بین ماده دی الکتریک و هوای اطراف آن در آون میکروویو و با توجه به توانایی نسبی دی الکتریک در جذب میدان الکترومغناطیسی بعد از دمایی مشخص (برای توان ۱۲۰۰ وات دمای نزدیک به ۱۳۰۰ کلوین)،

جدول ۱ - پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی این پژوهش

پارامتر	اکسید آهن	کربن فعال
قابلیت انتشار (E) [۲۷]	۰/۹۸	۰/۹۵
هدایت الکتریکی ^۱ [۲۹، ۲۸]	$10^{(0.0033 \times (1000/T) - 0.0081)}$	۵۲
مقاومت الکتریکی ^۲ [۳۰]	$\exp(-1.4636 \times (1000/T) + 0.4131)$	-
بزرگی میدان الکتریکی در سطح برای میکروویو مورد استفاده در توان ۱۲۰۰ وات ($\frac{V}{m}$)	۲۷۴۴	۲۷۴۴
چگالی (g/m^3)	$5/24 \times 10^6$	$2/22 \times 10^6$
ظرفیت گرمایی حجمی در فشار ثابت (Cp)	$12.62 + 0.001492 \times T - 76200/(T^2)$	-
ثابت دی الکتریک نسبی ^۳ (موهومی) [۳۱]	-	۱۳/۵
ثابت نفوذپذیری نسبی (موهومی) ^۴ [۳۱]	-	۰



نمودار ۱ - منحنی دما-زمان برای بستر کربن فعال در توان ۱۲۰۰ وات [۱۷]

بسیار پایین است. بنابراین، در این پژوهش تنها دمای بستر کاتالیستی پیرولیز به عنوان عامل ایجاد گرما معرفی شد.

همانطور که در نمودار ۱ ملاحظه می‌شود، داده‌های محاسباتی بسیار نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی بوده و حداکثر و متوسط خطای محاسباتی بر اساس معادله (۱) که برای مواد دی الکتریک صادق می‌باشد و جایگذاری آن در معادله (۹) به ترتیب برابر ۸/۵ درصد و ۵ درصد تعیین شد. خطای بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل‌سازی به دلایل زیر روی داده است:

- این خطا می‌تواند به دلیل فرضیات ساده کننده در فرآیند مدل‌سازی باشد. پیش‌تر فرض شد کل گرانول به صورت کاملاً

(۱) Electrical conductivity

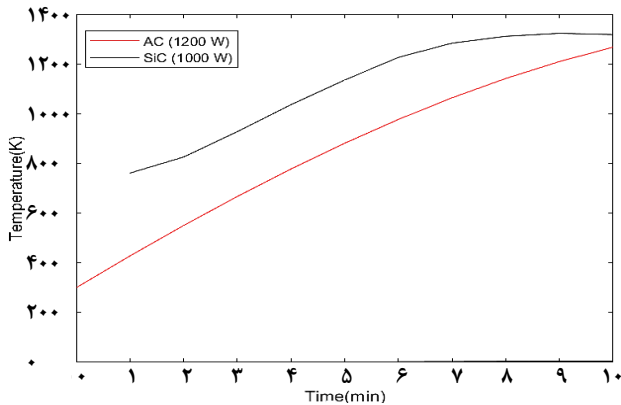
(۳) The relative dielectric constant

(۲) Electrical resistivity

(۴) The relative permeability constant

جدول ۲ - کدهای متلب پایه مورد استفاده

مدلسازی	کد مورد استفاده	پارامترهای محاسبه شده
افزایش دمای بستر کربنی	<pre> Deltat=1; time=0:Deltat:10; AV= input(' AV:'); % A/V=the area of bed/the volume of bed h=125; %heat convection cofficent Ro= input('Ro:'); %density Ta= input('Ta:'); P=input('P:'); %power Iav=P/0.1; Erms=(((2*Iav)/(3e8*8.85e-12))^0.5)/(2^0.5); ped=2*pi*2*2.45*1e9*(8.85e-12*13.5*((Erms)^2)); for i=1:length(time)-1 T(1)=300; T(i+1)=(T(i)+(Deltat./(Ro*0.7)).*(ped-(h*AV*(T(i)-Ta))-5.57e- 8*AV*0.95*(T(i)^4-Ta^4))) end plot(time,T,'r--') xlabel('time(min)') ylabel('Temperature(K)') legend('Predicted') </pre>	<p>- روند افزایش دمای بستر کربن</p> <p>- تاثیر توان میکروویو</p> <p>- تاثیر نوع دی الکتریک</p> <p>- تاثیر چگالی جاذب امواج میکروویو</p> <p>- تاثیر دمای محیط</p> <p>- تاثیر پارامتر قابلیت انتشار</p> <p>- تاثیر نسبت سطح به حجم</p>
افزایش دمای گرانول	<pre> clear clc close all rp=0.1 E0=3000 h=125 Ta=300 Deltat=1 time=0:Deltat:1; Ro=5.24*10^+6 Eta0=377; AV=20; lambda0=0.1224; Zaribconv=h*(AV); T(1)=300; T_s=[450,590,670,755,850,895,960,1080,1120, 1173]; for i=1:length(time)-1 Sigma=exp(-1.4636*(1000./T(i)) + 0.4131); electricalresistivity=10^(0.0033*(1000./T(i)- 0.0081)); Delta=0.029*(electricalresistivity*lambda0)^0.5); Rs=1/(Delta*Sigma); Ped=(6*Rs*(E0^2))/((Eta0^2)*rp); T(i+1)=(T(i)+(Deltat./(Ro.*(12.62+0.001492.*T(i)-76200./(T(i).^2))))).*(Ped- (244*h.*(T(i)-Ta))-(5.57e-8)*0.98*(T(i)^4-Ta^4))); end t=1:1:10; plot(time,T) xlabel('time(min)') ylabel('Temperature(K)') legend('Predicted','Experimental') </pre>	<p>- روند افزایش دمای اکسید آهن</p>

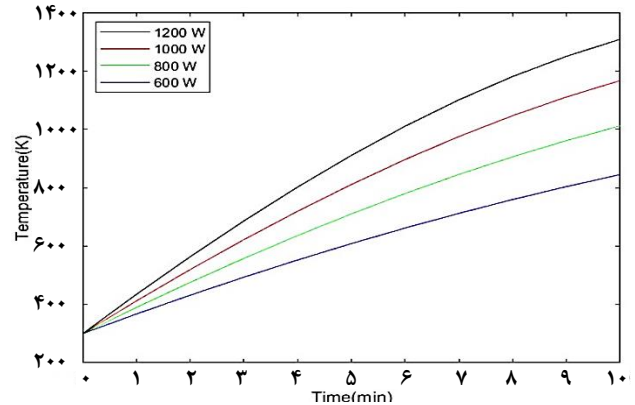


نمودار ۳ - منحنی دما-زمان برای کربن فعال و سیلیسیم کاربرد [۲۵]

هزینه‌های مرتبط با استفاده از دستگاه مایکروویو با توان بالاتر از سیلیسیم کاربرد به جای کربن فعال بهره برد. علاوه بر این، مطالعات نشان داده است که در مراحل اولیه گرمایش مرطوب سازی ماده نیز می‌تواند سبب افزایش تانژانت اتلاف و افزایش اتلافات امواج الکترومغناطیسی توسط جاذب شود.

تأثیر چگالی جاذب امواج مایکروویو

چگالی جاذب امواج مایکروویو از جمله پارامترهایی است که می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بازدهی راکتور داشته باشد. انواع بسیار متنوعی از کربن وجود دارد که هر کدام از نظر مقدار چگالی با یکدیگر متفاوت هستند و خواص دی الکتریک متفاوتی نیز از خود نشان می‌دهند. در نمودار ۴ تأثیر چگالی کربن فعال بر میزان افزایش دمای بستر کربنی ارائه گردید. همانطور که ملاحظه می‌شود، بر اساس مدل‌سازی انجام شده با افزایش میزان چگالی کربن فعال شیب روند افزایش دمای آن کاهش چشمگیری می‌یابد. این نتیجه در توافق با نتایج ارائه شده توسط کومه و همکاران [۳۴] می‌باشد که تأیید کننده رابطه معکوس تانژانت اتلاف با چگالی ماده می‌باشد. مشخص است که در یک وزن ثابت با افزایش میزان حجم، چگالی ماده کاهش می‌یابد. در سیستم پیشنهادی امواج مایکروویو به صورت حجمی و پخش شونده در فضای دستگاه مایکروویو با استفاده از یک مگنترون پخش می‌گردد. بنابراین، با افزایش حجم و اشغال فضای بیشتر در یک وزن ثابت، امواج الکترومغناطیسی بیشتری در ماده به دام افتاده و به گرما تبدیل می‌گردد. در صورتی که اگر به جای مگنترون از یک جریان الکتریکی مستقیم استفاده شود، تمام جریان الکتریکی از یک سطح مشخص عبور می‌کند. بنابراین، در این حالت افزایش چگالی می‌تواند سبب افزایش بیشتر دمای بستر کربنی شود.



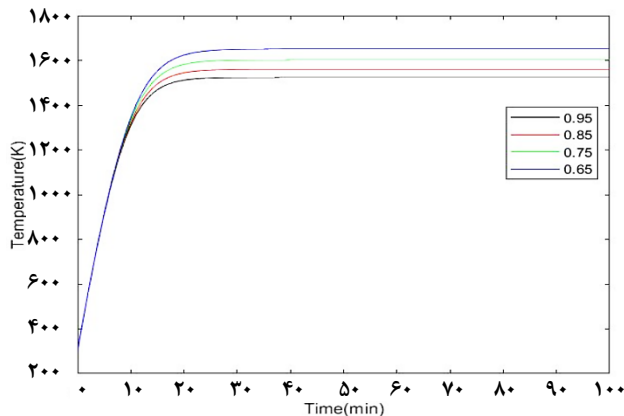
نمودار ۲ - دمای مایکروویو به صورت تابعی از زمان تابش امواج مایکروویو برای چهار توان متفاوت ۱۲۰۰، ۱۰۰۰، ۸۰۰ و ۶۰۰ وات

روند افزایش دمای دی الکتریک کند خواهد شد. یکی دیگر از پارامترهایی که در این سیستم سبب افزایش دمای بستر خواهد شد، اثر ماکسول-واگنر می‌باشد. با توجه به وجود فضاهای خالی بین ذرات، بردارهای میدان الکتریکی در این فضاها به دام افتاده و به صورت انرژی گرمایی تلف می‌شوند [۲۴].

تأثیر نوع دی الکتریک مورد استفاده

مشخص شده است که دمای پودر فشرده سیلیسیم کاربرد پس از ۷ دقیقه حرارت‌دهی توسط امواج مایکروویو به ۱۳۰۰ کلون می‌رسد [۲۵]. در عین حال، حداکثر افزایش دما برای کربن فعال پس از ۱۰ دقیقه حدود ۱۲۵۰ کلون محاسبه شد. دلیل در نظر گرفتن زمان ۱۰ دقیقه انجام کل فرآیند گرمادهی و کاهش ذرات اکسید آهن موجود در بستر کربنی در این مدت زمان است. بنابراین، همانطور که انتظار می‌رود، سیلیسیم کاربرد در مقایسه با کربن فعال در زمینه جذب امواج مایکروویو عملکرد بهتری دارد (نمودار ۳). باید توجه داشت که دستگاه مایکروویو مورد استفاده در این پژوهش ۱۲۰۰ وات توان داشت در حالی که توان دستگاه مورد استفاده در پژوهش [۲۵] ۱۰۰۰ وات بود.

دلیل افزایش بیشتر دمای سیلیسیم کاربرد در مقایسه با کربن فعال کاملاً مرتبط با خواص دی الکتریک آن می‌باشد. سیلیسیم کاربرد از نقطه نظر اتلافات امواج الکترومغناطیسی نسبت به کربن فعال عملکرد بهتری دارد [۳۲، ۳۳]. همانطور که ملاحظه می‌شود، شیب افزایش دمای سیلیسیم کاربرد بسیار بیشتر از کربن فعال بوده اما در دقیقه ۱۰ تقریباً هر دوی آن‌ها دمای یکسانی دارند. بنابراین، استفاده از یک جاذب مناسب برای سیستم بسیار حائز اهمیت است. برای مایکروویوهای توان پایین می‌توان به جای متحمل شدن



نمودار ۶ - منحنی دما-زمان برای کربن فعال با در نظر گرفتن مقادیر مختلف پارامتر قابلیت انتشار

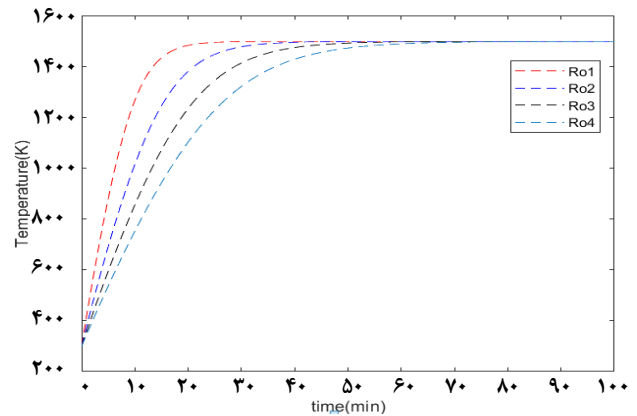
حداکثر دمای قابل دستیابی با افزایش پارامتر قابلیت انتشار کاهش می‌یابد. در این سیستم، با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای انتشار، دمای کافی برای انجام فرآیند کاهش اکسیدهای فلزی تامین شده است. در حقیقت با افزایش پارامتر قابلیت انتشار، میزان افت دمای سیستم به ویژه در دماهای بالا افزایش یافت.

موادی که به عنوان جاذب‌های موثر امواج میکروویو شناخته می‌شوند، دارای خواص دی الکتریک بسیار متفاوتی هستند. به عنوان نمونه، کربن فعال که در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفته است، از این قاعده مستثنا نیست. روش‌های بسیار گسترده‌ای برای تولید کربن فعال در ادبیات معرفی شده و کربن‌های فعال تولیدی از نظر خواص دی الکتریک تفاوت بسیاری با یکدیگر دارند. یکی از خواصی که برای هر نوع کربن فعال متفاوت است پارامتر قابلیت انتشار می‌باشد. بر این اساس، در این پژوهش مقادیر مختلف این پارامتر بررسی و مشخص شده است که افزایش میزان پارامتر قابلیت انتشار سبب اتلاف حرارتی بیشتر سیستم به سبب افزایش انتقال حرارت تشعشعی از بستر کربنی به محیط اطراف راکتور خواهد شد [۲۴].

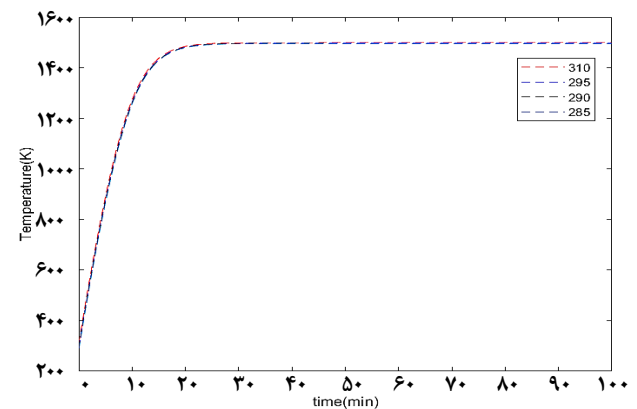
تأثیر وجود ذرات اکسید آهن (II) بر افزایش دمای بستر کربنی

همانطور که در نمودار ۷ مشخص است زمانی که ذرات گرانول به تنهایی در راکتور قرار می‌گیرند، افزایش دمای محسوسی پس از حدود ۱ دقیقه روی نخواهد داد.

دلیل عدم افزایش دمای ذرات اکسید آهن این واقعیت است که این ماده دارای مقدار تانژانت اتلاف پایینی است [۲۳]. پایین بودن مقدار تانژانت اتلاف نشان دهنده کمتر بودن اتلافات قطبشی



نمودار ۴ - رابطه چگالی کربن فعال و افزایش دمای بستر کربن در راکتور (Ro3: 386×10^3 , Ro2: 286×10^3 , Ro1: 186×10^3) و (Ro2:Ro4: 486×10^3)



نمودار ۵ - روند افزایش دمای بستر کربنی به صورت تابعی از دمای محیط (بر حسب درجه کلوین)

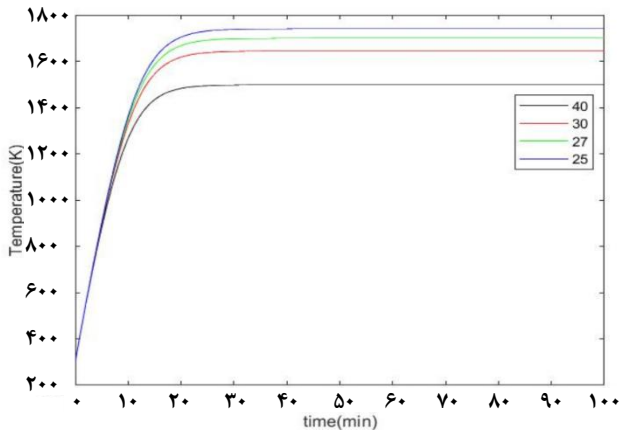
تأثیر دمای محیط بر روند افزایش دما

نمودار ۵ روند افزایش دمای بستر کربنی را به صورت تابعی از دمای محیط نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، کاهش دمای اولیه محیط از ۲۸۵ تا ۳۱۰ درجه کلوین تأثیر قابل توجهی بر میزان افزایش دمای بستر کربنی ندارد. بنابراین، استفاده از این سیستم برای فصول مختلف نیاز به پیش گرمایش ندارد و تأثیر آن قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

تأثیر پارامتر قابلیت انتشار

یکی از پارامترهای موثر در روند اتلاف گرمای سیستم پارامتر قابلیت انتشار^۱ می‌باشد. نمودار ۶ اثر تغییر قابلیت انتشار بر منحنی دما-زمان بستر کربن فعال را نشان می‌دهد. مشخص شده است که

(۱) Emissivity



نمودار ۸ - تاثیر پارامتر نسبت سطح به حجم بستر کربن برای چهار مقدار ۴۰، ۳۰، ۲۷ و ۲۵ (1/m)

گزارش شد می‌توان با در نظر گرفتن نسبت سطح به حجم برابر با ۲۵ نیز فرآیند تولید فلزات و آلیاژهای فلزی را در این سیستم انجام داد. در حقیقت هر اندازه میزان سطح نسبت به حجم بستر کربنی افزایش یابد، تجمع حرارتی در سیستم افزایش خواهد یافت و نرخ انتقال حرارت از بستر به محیط اطراف به صورت انتقال حرارت جابه جایی کاهش می‌یابد. کاهش میزان انتقال (در اینجا اتلاف) حرارت، سبب افزایش دمای نهایی بستر کربنی تحت امواج میکروویو شده است.

نتیجه‌گیری

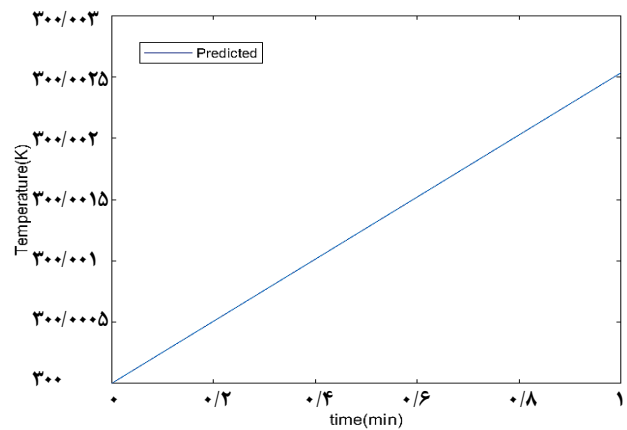
در این پژوهش، اثر پارامترهای توان میکروویو، نوع جاذب امواج میکروویو، چگالی جاذب، قابلیت انتشار و نسبت سطح به حجم بستر کربن بر میزان گرمایش بستر داخل راکتور به صورت عددی و با استفاده از یک رابطه کاملاً تئوری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

نتایج کیفی

- سیلیسیم کاربید یک بستر بسیار موثر به عنوان جایگزینی برای کربن فعال خواهد بود. استفاده از سیلیسیم کاربید حتی در میکروویو با توان ۱۰۰۰ وات سبب تولید گرمای بیشتری در مقایسه با کربن فعال در میکروویو با توان ۱۲۰۰ وات شده که پتانسیل بسیار بالای آن را در این فرآیند تایید کرد.

- سیستم پیشنهادی به دمای محیط حساسیت نداشته و تقریباً دمای محیط بر روند افزایش دمای بستر کربنی اثر گذار نمی‌باشد.

- افزایش سطح بستر نسبت به حجم آن مثبت قابل توجهی بر روند افزایش دمای سیستم دارد.



نمودار ۹ - منحنی دما-زمان برای ذرات اکسید آهن دو ظرفیتی

و هدایتی این ماده به نسبت کربن فعال و سیلیسیم کاربید است که همین امر سبب شده است تا دمای ذرات اکسید آهن خالص حتی در توان ۱۲۰۰ وات تغییر نکند. به صورت معمول مقدار توان جذب شده توسط این مواد بر اساس پارامتری به نام عمق نفوذ تعریف شده و بر اساس معادله (۳) محاسبه می‌شود. با این وجود، باید توجه داشت که اکسید آهن (III) به عنوان یک جاذب خوب امواج میکروویو شناخته می‌شود. ممکن است در طول فرآیند گرمایش، در مدت زمان کوتاهی گرانونول‌های اکسید آهن (II) به اکسید آهن (III) تبدیل شده و اکسید آهن (III) کمی بر افزایش دمای بستر تاثیر گذار باشد. با این حال، به سبب در بر گرفتن این ذرات توسط بستر از این موضوع صرف نظر شده است.

تاثیر پارامتر نسبت سطح به حجم بستر کربن

نمودار ۸ تاثیر پارامتر نسبت سطح به حجم بستر کربن را بر دمای بستر کربن نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش این مقدار میزان حداکثر دمای قابل دستیابی در راکتور کاهش می‌یابد. دلیل کاهش مقدار دما این واقعیت است که با توجه به افزایش سطح نسبت به حجم میزان انتقال حرارت به سبب دو مکانیزم انتقال حرارت جابه جایی و تشعشع افزایش یافته است. افزایش انتقال حرارت از سطح بستر کربنی به هوای اطراف بستر سبب افت دما خواهد شد.

بررسی روند افزایش دمای بستر به صورت تابعی از نسبت سطح به حجم می‌تواند در زمینه فرآیند افزایش مقیاس بستر بسیار مورد توجه قرار گیرد. در سیستم‌های صنعتی و نیمه صنعتی، نیاز است تا این نسبت به خوبی رعایت شود تا افت دمایی سیستم از حد مجاز خارج نشود. با توجه به اینکه، در راکتور پیشنهاد شده در پژوهش [۱۶] بهترین دما برای انجام فرآیند حدود ۹۰۰ درجه سلسیوس

سیستم‌های صنعتی و نیمه صنعتی رعایت این نسبت می‌تواند بسیار تاثیر گذار باشد.

بررسی‌های ابتدایی نشان داد که سیستم پیشنهادی از نظر بهره‌وری بازدهی مطلوبی به همراه دارد و در مدت زمان کمتر از ۳۰ دقیقه دمای مورد نیاز برای احیای کامل اکسید آهن و اکسید کبالت را تامین می‌کند. علاوه بر این، با توجه به اینکه این سیستم از کربن فعال برای افزایش گرما بهره می‌گیرد، واکنش احیای گاز/جامد اکسیدهای فلزی با این کربن نیز می‌تواند به عنوان یک عامل موثر عمل کند و مزایای سیستم را افزایش دهد. پس از بررسی‌های دقیق، توسعه یک سیستم نیمه صنعتی و آنالیز اقتصادی، این سیستم می‌تواند یک جایگزین موثر در شرکت‌هایی نظیر فولاد مبارکه اصفهان برای بخش احیای کوره بلند باشد. پژوهش‌های آتی و توسعه یک سیستم نیمه صنعتی بر مبنای راکتور پیشنهادی می‌تواند گامی موثر در جهت صنعتی‌سازی آن معرفی می‌گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹

- ذرات اکسید آهن دو ظرفیتی تأثیری بر روند افزایش دما نداشته است.

- با افزایش توان دستگاه میکروویو دما بستر کربنی به میزان قابل توجه افزایش می‌یابد.

نتایج کمی

- با بررسی چهار توان میکروویو مختلف ۱۲۰۰، ۱۰۰۰، ۸۰۰ و ۶۰۰ وات به صورت عددی، توان ۱۲۰۰ وات می‌تواند دمای بستر را در مقایسه با توان ۱۰۰۰ وات در مدت ۶ دقیقه حدود ۹ درصد افزایش دهد.

- در سیستم ارائه شده با افزایش پارامتر قابلیت انتشار از ۰/۸۵ به ۰/۹۵ میزان افت دمای بستر در حدود ۹ درصد افزایش می‌یابد.

- یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی سیستم نسبت سطح به حجم بستر کربن شناسایی شد. نسبت سطح به حجم برابر ۲۵ (با واحد m^{-1}) بهترین گزینه معرفی شده است. استفاده از نسبت سطح به حجم ۲۵ در مقایسه با ۴۰ سبب افزایش دمای بستر به میزان حدودی ۸ درصد شده است. در زمینه افزایش مقیاس و تولید

مراجع

- [۱] تقوی ایشکوه پ، خوش بین ر، آقایی ع، کریم زاده ر، ارزیابی ترمودینامیکی تولید هیدروژن از طریق واکنش ریفرمینگ متانول با بخار آب به کمک روش حداقل سازی انرژی آزاد گیبس، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۴۱: ۲۲۹-۲۲۱ (۲۰۲۱).
- [2] Chandran D., *Compatibility of Diesel Engine Materials with Biodiesel Fuel, Renewable Energy*, **147**: 89-99 (2020).
- [3] Seraç M.R., Aydın S., Yılmaz A., Şevik S., *Evaluation of Comparative Combustion, Performance, and Emission of Soybean-Based Alternative Biodiesel Fuel Blends in a CI Engine, Renewable Energy*, **148**: 1065-1073 (2020).
- [4] Hoang A.T., Tabatabaei M., Aghbashlo M., Carlucci A.P., Ölçer A.I., Le A.T., Ghassemi A., *Rice Bran Oil-Based Biodiesel as a Promising Renewable Fuel Alternative to Petrodiesel: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **135**: 110204 (2021).
- [5] ساری ع.ا، اسدی س، مدل‌سازی و شبیه‌سازی احتراق غیرکاتالیستی متان با شعله آرام برای تولید گاز سنتز، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۴۱: ۴۲۳-۴۰۱ (۲۰۲۱).
- [6] Valliyappan T., Bakhshi N.N., Dalai A.K., *Pyrolysis of Glycerol for the Production of Hydrogen or Syn Gas, Bioresource Technology*, **99(10)**: 4476-4483 (2008).

- [7] Shahirah M.N.N., Gim bun J., Ideris A., Khan M.R., Cheng C.K., [Catalytic Pyrolysis of Glycerol into Syngas over Ceria-Promoted Ni/A-Al₂O₃ Catalyst](#), *Renewable Energy*, **107**: 223-234 (2017).
- [8] Fernández Y., Arenillas A., Díez M.A., Pis J.J., Menéndez J.A., [Pyrolysis of Glycerol over Activated Carbons for Syngas Production](#), *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **84(2)**: 145-150 (2009).
- [9] Hou B., Zhang H., Li H., Zhu Q., [Study on Kinetics of Iron Oxide Reduction by Hydrogen](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **20(1)**: 10-17 (2012).
- [10] Tomić-Tucaković B., Majstorović D., Jelić D., Mentus S.J., [Thermogravimetric Study of the Kinetics of Co₃O₄ Reduction by Hydrogen](#), *Thermochimica Acta*, **541**: 15-24 (2012).
- [11] Nashtae P.S.b., Khoshandam B.J., [Noncatalytic Gas-Solid Reactions in Packed Bed Reactors: A Comparison between Numerical and Approximate Solution Techniques](#), *Chemical Engineering Communications*, **201(1)**: 120-152 (2014).
- [12] Moon I.J., Rhee C.H., Min D.J.J., [Reduction of Hematite Compacts by H₂-Co Gas Mixtures](#), *Steel research*, **69(8)**: 302-306 (1998).
- [13] Bonalde A., Henriquez A., Manrique M.J., [Kinetic Analysis of the Iron Oxide Reduction Using Hydrogen-Carbon Monoxide Mixtures as Reducing Agent](#), *Isij International*, **45(9)**: 1255-1260 (2005).
- [14] Ono-Nakazato H., Yonezawa T., Usui T.J., [Effect of Water-Gas Shift Reaction on Reduction of Iron Oxide Powder Packed Bed with H₂-Co Mixtures](#), *ISIJ international*, **43(10)**: 1502-1511 (2003).
- [15] Liu J.-h., Zhang J.-y., Zhou T.-p.J.G.Y.X., [Assessment of Apparent Activation Energies for Reducing Iron Oxides by Co and Co-H Sub 2](#), **12**: 5-9 (2000).
- [16] Shojae K., Khoshandam B., [A Novel Two-Step Fixed Bed Reactor for the Reduction of Cobalt Oxide under Microwave Heating](#), *Materials Science and Engineering: B*, **267**: 115085 (2021).
- [17] Shojae K., Khoshandam B., [The Experimental and Modeling Study on a New Process of Iron/Cobalt Alloy Production Using Indirect Reducing Agent of Glycerol under Microwave Heating](#), *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **171**: 108765 (2022).
- [18] Ahmed H., Morales-Estrella R., Viswanathan N., Seetharaman S., [Gas-Solid Reaction Route toward the Production of Intermetallics from Their Corresponding Oxide Mixtures](#), *Metals*, **6(8)**: 190 (2016).
- [19] Spreitzer D., Schenk J., [Reduction of Iron Oxides with Hydrogen—a Review](#), *Steel Research International*, **90(10)**: 1900108 (2019).
- [20] Naseri Seftejani M., Schenk J., Spreitzer D., Andreas Zarl M., [Slag Formation During Reduction of Iron Oxide Using Hydrogen Plasma Smelting Reduction](#), *Materials*, **13(4)**: 935 (2020).

- [21] Aeppli M., Voegelin A., Gorski C.A., Hofstetter T.B., Sander M., [Mediated Electrochemical Reduction of Iron \(Oxyhydr-\)Oxides under Defined Thermodynamic Boundary Conditions](#), *Environmental Science & Technology*, **52(2)**: 560-570 (2018).
- [22] Najmi N.H., Mohd Yunos N.F.D., Othman N.K., Idris A., [Characterisation of Reduction of Iron Ore with Carbonaceous Materials](#), *Solid State Phenomena*, **280**: 433-439 (2018).
- [23] Pozar D.M., "[Microwave Engineering](#)", John Wiley & Sons, (2011).
- [24] Metaxas A.a., Meredith R.J., "[Industrial Microwave Heating](#)", IET, (1983).
- [25] Mishra P., Upadhyaya A., Sethi G.J.M., B M.T., [Modeling of Microwave Heating of Particulate Metals](#), **37(5)**: 839-845 (2006).
- [26] Seplyarskii B., Kochetkov R., Lisina T., Alymov M., [The Conditions for the Implementation of the Convective Mode of Combustion for Granular Mixtures of Ti + X C](#), *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **558**: 012045 (2019).
- [27] Burgess G.K., Foote P.D., [The Emissivity of Metals and Oxides](#), *Iron Oxide*, (1915).
- [28] Warnes B.M., Aplan F.F., Simkovich G., [Electrical Conductivity and Seebeck Voltage of Fe₂O₃, Pure and Doped, as a Function of Temperature and Oxygen Pressure](#), *Solid State Ionics*, **12**: 271-276 (1984).
- [29] Sánchez-González J., Macías-García A., Alexandre-Franco M.F., Gómez-Serrano V., [Electrical Conductivity of Carbon Blacks under Compression](#), *Carbon*, **43(4)**: 741-747 (2005).
- [30] Itai R., Shibuya M., Matsumura T., Ishi G., [Electrical Resistivity of Magnetite Anodes](#), *Journal of The Electrochemical Society*, **118(10)**: 1709 (1971).
- [31] Jia B., Wang L., [Preparation of Microwave Absorbing Nickel-Based Activated Carbon by Electroless Plating with Palladium-Free Activation](#), *Bioresources*, **5**: 2248-2257 (2010).
- [32] Kuang J., Cao W., [Silicon Carbide Whiskers: Preparation and High Dielectric Permittivity](#), *Ceramics International*, **96(9)**: 2877-2880 (2013).
- [33] Ao W., Fu J., Mao X., Kang Q., Ran C., Liu Y., Zhang H., Gao Z., Li J., Liu G.J., Dai J., [Microwave Assisted Preparation of Activated Carbon from Biomass: A Review](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **92**: 958-979 (2018).
- [34] Kume S., Yasuoka M., Omura N., Watari K., [Effects of MgO Addition on the Density and Dielectric Loss of AlN Ceramics Sintered in Presence of Y₂O₃](#), *Journal of the European Ceramic Society*, **25(12)**: 2791-2794 (2005).