

شبیه سازی اثر پارامترهای کاری کوره و پارامترهای محیطی بر عملیات سطحی کربوراسیون گازی

سید محمد حسین مدرسی^{۱*}، مهرداد کاشفی^۲، جلیل وحدتی خاکی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: تیر ۱۳۸۸ پذیرش مقاله: مهر ۱۳۸۸	<p>امروزه شبیه سازی فرآیندهای متالورژیکی به دلیل کاهش تعداد آزمایشات جهت کنترل فرآیند و نیز کاهش وقت، مصرف انرژی و هزینه، مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این پروسه‌ها، فرآیند کربوراسیون گازی می باشد که در آن میزان درصد کربن سطح قطعات، مهمترین مشخصه تولید یک قطعه مطابق استاندارد می باشد. در این روش عملیات حرارتی سطحی، برای تعیین میزان کربن مورد نظر بر روی فولاد بایستی زمان و هزینه زیادی صرف انجام آزمایشات شود. در تحقیق حاضر، ابتدا واکنش های مستقل در کوره کربوراسیون تعیین و سپس با استفاده از نرم افزار MATLAB بصورت همزمان مدل سازی شده اند. در ادامه پس از حل معادلات ثابت تعادل به وسیله کامپیوتر، درصد کربن تعادلی سطح فولاد به دست آمده است. در نهایت برنامه نوشته شده با داشتن میزان گازهای تولید شده در ژنراتور تولید گاز گرماگیر (نسبت هوا به سوخت)، درجه حرارت کوره، فشار داخل کوره، رطوبت و دمای محیط، به عنوان ورودی، قادر به محاسبه درصد کربن در سطح فولاد بوده و می توان اثر تغییر پارامترهای فوق را بر درصد کربن سطح فولاد بررسی نمود. همچنین نتایج حاصل از این شبیه سازی با مقادیر تجربی بدست آمده از کوره های کربوراسیون گازی مقایسه شده و تطابق خوبی را نشان می دهد.</p>
<p>واژگان کلیدی: رطوبت نسبی محیط نسبت هوا به سوخت کربوراسیون گازی شبیه سازی</p>	

۱- مقدمه

پروپان - بدلیل سهولت در نگهداری و ارزان قیمت بودن متان، بیشتر از این گاز استفاده می شود- وارد مولد تولید گاز گرماگیر شده و از سوی دیگر هوا بصورت کنترل شده وارد محفظه شده تا احتراق در دمای حدود ۱۰۰۰ درجه سلسیوس صورت گیرد. در اثر این واکنش مخلوطی از گازهای دی اکسید کربن، بخار آب، منوکسید کربن و هیدروژن تولید می شود. سپس این مخلوط گازی را که با مقداری گاز متان و گاز نیتروژن همراه است وارد محفظه کوره گردیده تا با سطح قطعه‌ی مورد نظر برای کربوراسیون به تعادل برسد [۱].

کربوراسیون گازی به جهت افزایش سختی سطح و ایجاد مقاومت به سایش بر روی قطعات انجام شده و در تولید انبوه قطعات صنعتی بویژه قطعات خودرو کاربرد زیادی یافته است. روند کلی در فرآیند کربوراسیون گازی بدین صورت است که مقدار مشخصی از گاز شهری، متان و یا

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mo_modarresi2003@yahoo.com

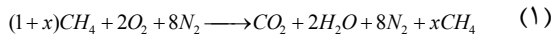
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

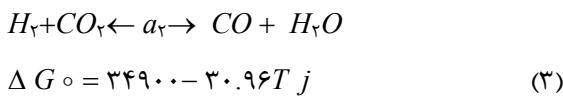
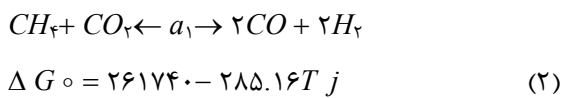
۳. استاد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از گاز متان به عنوان گاز کربن ده استفاده شده است. گاز متان در مولد تولید گاز طبق واکنش زیر سوزانده شده و محصولات احتراق وارد محفظه کوره می‌شوند [۱۶]:



محصولات احتراق شامل مخلوطی از گازهای CO_2 , CO , H_2 , H_2O , CH_4 , N_2 بوده که طبق واکنش‌های مستقل زیر در تعادل با یکدیگر قرار می‌گیرند:



با توجه به ۳ واکنش فوق و تعیین تعداد مول‌های کل سیستم $(11+x+2\alpha_1)$ ، فشار جزئی اجزاء گازی سیستم بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$P_{CO} = \frac{2\alpha_1 + \alpha_2}{11+x+2\alpha_1} P_t \quad P_{H_2} = \frac{2\alpha_1 - \alpha_2}{11+x+2\alpha_1} P_t$$

$$P_{CO_2} = \frac{1 - \alpha_1 - \alpha_2}{11+x+2\alpha_1} P_t \quad P_{H_2O} = \frac{2\alpha_1 - \alpha_2}{11+x+2\alpha_1} P_t$$

$$P_{CH_4} = \frac{x - \alpha_1}{11+x+2\alpha_1} P_t \quad P_{N_2} = \frac{2\alpha_1 - \alpha_2}{11+x+2\alpha_1} P_t$$

با داشتن ارتباط $\Delta G^\circ = -RT \ln k$ معادلات ۴ و ۵ برای واکنش‌های ۲ و ۳ بدست می‌آیند.

$$\frac{(2\alpha_1 + \alpha_2)^2 (2\alpha_1 - \alpha_2)^2 P_t^2}{(x - \alpha_1)(1 - \alpha_1 - \alpha_2)(11+x+2\alpha_1)^2} = \exp\left(64.3 - \frac{31481}{T}\right) \quad (4)$$

$$\frac{(2\alpha_1 + \alpha_2)(2 + \alpha_2)}{(2\alpha_1 - \alpha_2)(1 - \alpha_1 - \alpha_2)} = \exp\left(3.724 - \frac{4197.739}{T}\right) \quad (5)$$

این معادلات نشان دهنده ارتباط متغیر پیشرفت واکنش‌های ۲ و ۳ با متغیرهای فشار کل، دما و نسبت هوا به سوخت می‌باشند. به منظور بررسی اثر رطوبت نسبی هوای محیط و دمای محیط بر درصد کربن رسوبی بر سطح قطعه فولادی، از رابطه بین فشار اشباع بخار آب و درجه حرارت محیط استفاده شده است [۱۷]:

پس از به تعادل رسیدن این گازها با سطح قطعه، فشار جزئی هریک از گازها در محفظه کوره تعیین شده، سپس با داشتن فشار جزئی منوکسید کربن و دی اکسید کربن باتوجه به واکنش بودووارد $2CO \rightarrow C + CO_2$ اکتیویته کربن روی سطح فولاد محاسبه می‌گردد. با داشتن ارتباط بین اکتیویته کربن و درصد وزنی کربن می‌توان درصد وزنی کربن روی سطح فولاد رادراثر فرآیند کربوراسیون بدست آورد.

Chekanskii از اولین کسانی است که در زمینه کربوراسیون گازی تحقیق نموده و به بررسی فرآیند کربوراسیون گازی در یک اتمسفر فعال شده با گاز گرماگیر، پرداخته است [۲]. امروزه با توجه به پیشرفت علم متالورژی و نیاز به شبیه سازی فرآیند کربوراسیون به جهت کاهش زمان تولید و افزایش دقت، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است [۳،۴،۵،۶،۷].

از جمله کسانی که در سال‌های اخیر در زمینه مدل سازی فرآیند کربوراسیون گازی تحقیقات وسیعی انجام داده است، می‌توان Karabelchtchikov و Sisson را نام برد [۸،۹،۱۰،۱۱،۱۲]. آنها همچنین در زمینه تاثیر زبری سطح بر سرعت انتقال جرم در طی فرآیند کربوراسیون گازی و نیز تاثیر عناصر آلیاژی بر راندمان فرآیند کربوراسیون گازی و بهینه سازی فرآیند کربوراسیون گازی در کوره‌های تک بار تحقیقات گسترده‌ای انجام داده‌اند [۱۳،۱۴،۱۵].

از پارامترهایی که بر درصد وزنی کربن در سطح فولاد بسیار تأثیرگذار است نسبت هوا به سوخت، دمای کوره، فشار کوره، رطوبت نسبی و دمای هوای محیط می‌باشند. در این پژوهش به کمک نرم افزار تهیه شده بر پایه زبان برنامه نویسی MATLAB، اثر این پارامترها را بر درصد وزنی کربن رسوب داده بر سطح قطعه فولادی، مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی ترمودینامیکی حاصله قابلیت بررسی تغییر متغیرهای عملی کوره و متغیرهای محیطی بر درصد کربن سطح را دارا می‌باشد.

نهایتا با استفاده از رابطه (۱۰)، اکتیویته کربن به درصد وزنی کربن روی سطح فولاد تبدیل شده است [۱]:

$$\ln a_c = \ln \left[\frac{4.65w}{100-w} \right] + \frac{9167 \times \left[\frac{4.65w}{100-w} \right] + 5093}{T} - 1.867 \quad (10)$$

همچنین با استفاده از روابط زیر می‌توان ارتباط بین اکتیویته کربن و نقطه شبنم را بدست آورد [۱]:

نقطه شبنم عبارتست از دمایی که در آن دما اولین قطرات آب تشکیل می‌شود.

$$T_{dew} = \frac{542218}{14.7316 - \ln P_{H_2O}} - 273.16 \quad (11)$$



$$\Rightarrow \frac{a_c \cdot P_{H_2O}}{P_{H_2} \cdot P_{CO}} = \exp(-17.26 + 16333.895) \quad (12)$$

تمامی محاسبات فوق توسط برنامه شبهه سازی تهیه شده، انجام می‌گیرد. دقت محاسبات توسط نتایج حاصله از کوره کربوراسیون گازی Carbosib ۲۰۲ صحت سنجی شده است. همچنین ترکیب گاز مصرفی اندازه گیری شده در کوره نشان دهنده بیش از ۹۸٪ متان می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

این پژوهش بر اساس شبهه سازی ترمودینامیکی واکنش‌های گازی و با استفاده از نرم افزار MATLAB صورت گرفته تا به سهولت و سرعت، تنها با وارد کردن پارامترهای موثر بر عملیات سطحی کربوراسیون گازی مانند دمای کوره، فشار کوره، نسبت هوا به سوخت و دما و رطوبت محیط بتوان درصد وزنی کربن در تعادل با اتمسفر کوره (درصد کربن در سطح قطعه) را بدست آورد. همچنین این برنامه قادر است با در اختیار داشتن متغیرهای عملی کربوراسیون گازی مانند نسبت هوا به سوخت، دمای کوره، فشار کوره و متغیرهای محیطی مانند دما و رطوبت نسبی محیط بعنوان ورودی برنامه، اطلاعات و نمودارهای کاربردی مفیدی را از شرایط کوره در اختیار قرار دهد.

$$P_{H_2O}^{عشبهه} = \exp\left(\frac{-5417.98}{T_{air}} + 14.736\right) \quad (6)$$

طبق تعریف، رطوبت نسبی عبارتست از نسبت فشار جزئی بخار آب به فشار اشباع بخار آب:

$$\% \text{ رطوبت نسبی} = P_{H_2O}^* / P_{H_2O}^{عشبهه} \quad (7)$$

$$\rightarrow P_{H_2O}^* = P_{H_2O}^{عشبهه} \times \% \text{ رطوبت نسبی}$$

با جمع کردن فشار جزئی بخار آب موجود در هوای محیط با P_{H_2O} مربوط به واکنش (۳) داریم:

$$H_2 + CO_2 \leftarrow a_2 \rightarrow CO + H_2O$$

$$\Rightarrow \exp\left(3.724 - \frac{4197.739}{T}\right) = \frac{[2 + \alpha_2 + (P_{H_2O}^* \cdot n_t)] \cdot (2\alpha_1 + \alpha_2)}{(2\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (1 - \alpha_1 - \alpha_2)} \quad (8)$$

با انتخاب متغیرهای کاری کوره یعنی دمای کوره، فشار کاری کوره، نسبت هوا به سوخت مصرفی و متغیرهای محیطی کوره یعنی دمای هوای ورودی به کوره و درصد رطوبت نسبی محیط به عنوان ورودی برنامه شبهه سازی و حل همزمان معادلات ۴ و ۸، مقادیر α_1, α_2 محاسبه می‌گردند.

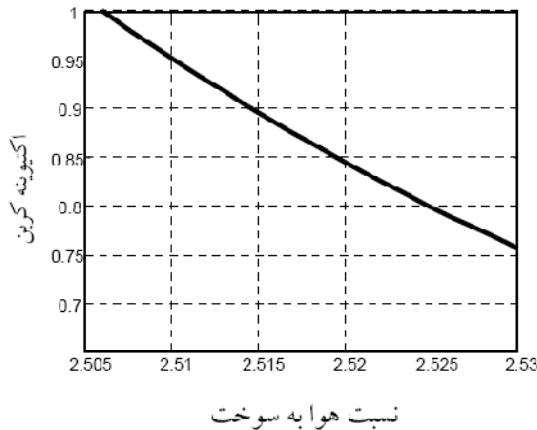
مقدار X در معادله (۴)، با توجه به واکنش (۱) و نسبت هوا به سوخت به عنوان ورودی بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{air}{fuel} = \frac{2+8}{1+x} \Rightarrow X \text{ بدست می‌آید}$$

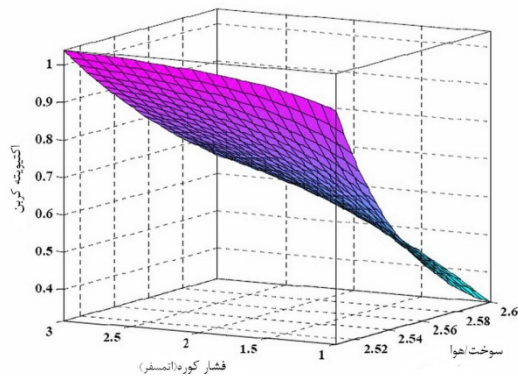
با قراردادن مقادیر a_1 و a_2 در معادلات مربوط به فشار جزئی گازها، مقادیر تعادلی برای P_{CO_2}, P_{CO} ، $P_{CH_4}, P_{H_2O}, P_{H_2}$ تعیین می‌گردد. با داشتن P_{CO_2}, P_{CO} تعادلی کوره و با توجه به معادله بودووارد، اکتیویته کربن در سطح قطعه فولادی از طریق رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$a_c = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} \cdot \exp\left(-20.984 + \frac{20531.63}{T}\right) \quad (9)$$

خواهد داشت در حالیکه در نسبت های بیشتر، تغییرات فشار کوره باعث تغییر پتانسیل کوره می شود. یکی از علل انتخاب نسبت هوا به سوخت مصرفی برابر با ۲/۵ در کوره های کربوراسیون گازی این است که تغییرات ناگهانی فشار باعث تغییر پتانسیل کوره نشود.



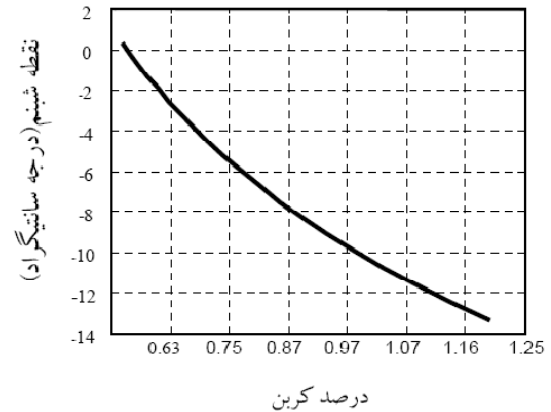
شکل ۲- تغییرات اکتیویته کربن سطح با نسبت هوا به سوخت در دمای ۹۲۷ سلسیوس، فشار ۱ اتمسفر



شکل ۳- تغییرات همزمان اکتیویته کربن بر حسب فشار کوره و نسبت هوا به سوخت در دمای ۹۲۷ درجه سلسیوس

شکل ۴ تغییرات همزمان اکتیویته کربن با دمای کوره و نسبت هوا به سوخت در فشار ۱ اتمسفر را نشان می دهد. این نمودار سه بعدی بیانگر این است که با کاهش دما، اکتیویته کربن کوره افزایش می یابد و همچنین در نسبت های هوا به سوخت بالاتر تغییرات دما باعث تغییر شدیدتری در اکتیویته کربن کوره می شود در حالیکه در نسبت های هوا به سوخت کمتر، تغییرات دما تاثیر کمتری بر اکتیویته کربن کوره می گذارد.

شکل ۱ تغییرات نقطه شبنم بر حسب درصد کربن سطح را نشان می دهد. در این نمودار دما ۹۲۷ درجه سلسیوس و فشار کوره ۱ اتمسفر انتخاب و نسبت هوا به سوخت بین ۲/۵۱ و ۲/۶ متغیر است. مشاهده می شود که با کاهش نقطه شبنم، درصد کربن افزایش می یابد همچنین در نقطه شبنم ۱۳- درجه سلسیوس، درصد کربن ۱/۲ است که مطابق با اطلاعات ذکر شده در مرجع [۱] است.



شکل ۱- تغییرات درصد کربن با نقطه شبنم در فشار ۱ اتمسفر، دمای ۹۲۷ سلسیوس، هوا به سوخت ۲/۶-۲/۵۱

شکل ۲ تغییرات اکتیویته کربن سطح با نسبت هوا به سوخت را در دمای ۹۲۷ سلسیوس و فشار ۱ اتمسفر نمایش می دهد. مشاهده می شود که با افزایش این نسبت، با توجه به واکنش (۱)، میزان متان کاهش یافته و در نتیجه با توجه به واکنش (۲) و اصل لوشاتلیه، واکنش به سمت چپ میل می کند. نتیجتاً مقدار CO_2 افزایش و میزان CO کاهش می یابد که نتیجه آن کاهش اکتیویته کربن در واکنش بود و وارد می باشد. در تحقیق حاضر نسبت هوا به سوخت مصرفی برای حداکثر راندمان کربوراسیون گازی (در حالت گاز سوختنی متان) برابر ۲/۵۰۸ بدست آمده است، که تطابق بسیار خوبی با نسبت ذکر شده در مرجع [۱] دارد.

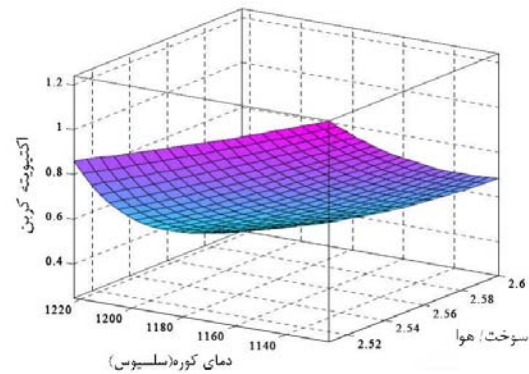
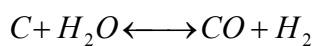
شکل ۳ تغییرات همزمان اکتیویته کربن بر حسب فشار کوره و نسبت هوا به سوخت در دمای ۹۲۷ سلسیوس را نشان می دهد. این نمودار سه بعدی نشان می دهد که در نسبت های هوا به سوخت پایین و نزدیک ۲/۵، تغییرات فشار بر اکتیویته کربن تأثیر ناچیزی (در حد ۰/۰۱)

تحت شرایط ذکر شده وجود دارد و در تمامی منحنی ها با کاهش نسبت هوا به سوخت، نقطه شبنم کاهش می یابد.

شکل ۶ تغییرات درصد کربن سطح با نسبت هوا به سوخت را برای نتایج تجربی حاصله از کوره کربوراسیون گازی و نتایج شبیه سازی شده نشان می دهد. دمای کوره ۸۸۰ درجه سلسیوس، فشار کاری کوره ۱ اتمسفر، دمای محیط ۲۱ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی محیط ۶۵٪ تعیین شده است. همچنین نتایج حاصل از شبیه سازی در صورت انتخاب هوای کاملا خشک نیز در منحنی آورده شده است.

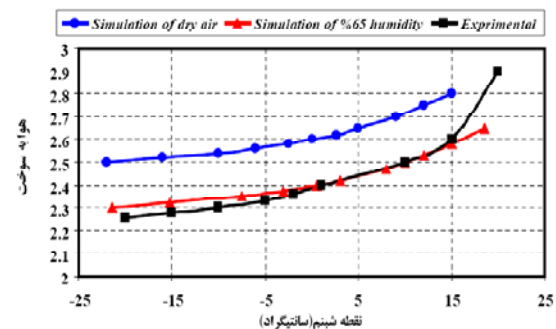
در این نمودار نیز انطباق بسیار خوبی بین منحنی پیش بینی شده توسط نرم افزار برای هوای مرطوب و منحنی رسم شده از نتایج کوره تحت شرایط ذکر شده، وجود دارد. همچنین در هوای مرطوب نسبت به هوای خشک تحت شرایط یکسان، کاهش شدیدی در درصد کربن رسوبی سطح قطعه فولادی ایجاد می شود که میزان کاهش در نسبت های هوا به سوخت کمتر و نزدیک به ۲/۵ شدیدتر از نسبت های بالاتر می باشد.

شکل ۷ تغییرات اکتیویته کربن سطح را بر حسب رطوبت نسبی محیط تحت شرایط فشار کاری کوره ۱ اتمسفر، دمای کوره ۹۲۷ سلسیوس، نسبت هوا به سوخت ۲/۵۰۸ و دمای محیط ۳۰ درجه سلسیوس نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش رطوبت، اکتیویته کربن کاهش می یابد که این مسئله باعث کاهش شدید راندمان کربوراسیون گازی خواهد داشت. علت این است که با افزایش رطوبت، فشار جزئی بخار آب افزایش می یابد ($P_{H_2O}^*$) که این امر خود باعث افزایش P_{H_2O} داخل کوره می شود و طبق واکنش تعادلی زیر با افزایش P_{H_2O} بر اساس اصل لوشاتلیه واکنش به سمت راست میل پیدا کرده و باعث کاهش اکتیویته کربن می شود:



شکل ۴- تغییرات همزمان اکتیویته کربن بر حسب دمای کوره و نسبت هوا به سوخت در فشار ۱ اتمسفر

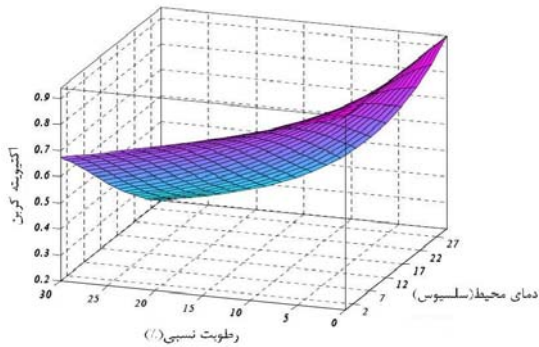
به جهت تعیین دقت محاسبات شبیه سازی، نتایج حاصله با مقادیر تجربی حاصل از کارکرد کوره کربوراسیون گازی Carbosib ۲۰۲ مقایسه شده است.



شکل ۵- تغییرات نقطه شبنم با نسبت هوا به سوخت در دو حالت تجربی و شبیه سازی برای هوای خشک و مرطوب در دمای ۹۹۰ درجه سلسیوس، فشار ۱ اتمسفر، دمای محیط ۲۴ درجه و رطوبت ۶۵٪

شکل ۵ تغییرات نقطه شبنم با نسبت هوا به سوخت را برای نتایج تجربی حاصله از کوره کربوراسیون گازی و نتایج شبیه سازی شده نشان می دهد. دمای کوره ۹۹۰ درجه سلسیوس، فشار کاری کوره ۱ اتمسفر، دمای محیط ۲۴ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی هوای محیط ۶۵٪ تعیین شده است. همچنین نتایج حاصل از شبیه سازی در صورت انتخاب هوای کاملا خشک نیز در منحنی آورده شده است. مشاهده می شود که انطباق بسیار خوبی بین منحنی پیش بینی شده توسط نرم افزار برای هوای مرطوب و منحنی رسم شده از نتایج کوره کربوراسیون

۱۵ درجه سلسیوس نسبت به دماهای پایین تر (نزدیک صفر)، رطوبت باعث کاهش شدیدتر در اکتیویته کربن می شود. همچنین در رطوبت های پایین تاثیر دمای محیط بر اکتیویته کربن سطح بسیار کمتر از رطوبت های بالا می باشد.



شکل ۸- تغییرات همزمان اکتیویته کربن بر حسب رطوبت محیط و دمای محیط در دمای ۹۲۷ درجه سلسیوس، نسبت هوا به سوخت ۲/۵۱ و فشار ۱ اتمسفر برای دمای محیط ۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس و رطوبت محیط ۰ تا ۳۰ درصد

علاوه بر نتایج ارائه شده، نرم افزار تهیه شده قادر به محاسبه سریع تغییرات تمامی پارامترهای تاثیرگذار بر کربوراسیون گازی و در نتیجه اثر پارامترهای فوق بر پتانسیل کوره می باشد.

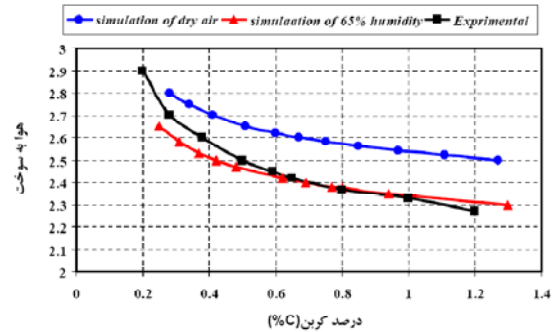
۴- نتیجه گیری

شبیه سازی حاصله با استفاده از محاسبات کامپیوتری، تطابق بسیار خوبی را با نتایج تجربی در کوره کربوراسیون گازی Carbosib ۲۰۲ و نتایج موجود تئوریک نشان می دهد و از نتایج مهم این پژوهش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

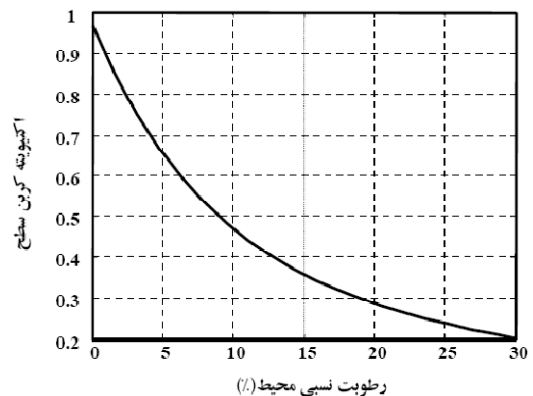
- با کاهش نقطه شبنم در گاز کوره، کاهش نسبت هوا به سوخت، کاهش درجه حرارت کربوراسیون و افزایش فشار کاری کوره، درصد کربن سطح قطعه کربوره شده افزایش می یابد. که در نسبت های هوا به سوخت

برای جبران این کاهش شدید اکتیویته کربن راهکارهای زیر پیشنهاد می شود:

- ۱- کاهش درجه حرارت کوره
- ۲- افزایش فشار کوره
- ۳- کاهش نسبت هوا به سوخت



شکل ۶- تغییرات درصد کربن سطح با نسبت هوا به سوخت در دو حالت تجربی و شبیه سازی برای هوای خشک و مرطوب در دمای ۸۸۰ سلسیوس، فشار ۱ اتمسفر، دمای محیط ۲۱ سلسیوس و رطوبت ۶۵٪



شکل ۷- اثر رطوبت محیط بر اکتیویته کربن سطح تحت شرایط فشار ۱ اتمسفر، دمای ۹۲۷ سلسیوس، هوا به سوخت ۲/۵۰۸ و دمای محیط ۳۰ درجه سلسیوس

شکل ۸ تاثیر همزمان رطوبت نسبی هوای محیط و دمای محیط را بر اکتیویته کربن سطح تحت شرایط دمای ۹۲۷ درجه سلسیوس، نسبت هوا به سوخت ۲/۵۱ و فشار ۱ اتمسفر نشان می دهد.

این نمودار برای دمای محیط ۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی محیط ۰ تا ۳۰ درصد توسط نرم افزار رسم شده است. مشاهده می شود که در دماهای محیط بالای

طوریکه در رطوبت های کمتر از ۵٪ قابل صرف نظر کردن است.

- شبیه سازی حاصله می تواند در جهت اهداف آموزشی نیز بکار رود زیرا بدون انجام محاسبات طولانی می توان تاثیر پارامترهای مختلف را بر درصد کربن سطح در حداقل زمان ممکن بررسی نمود.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از طرح تحقیقات اساسی وزارت صنایع و معادن بابت حمایت مالی از این پروژه و گروه صنعتی مجموعه سازی طوس واحد پیشتاز قطعه سناباد بابت حمایت مالی و همچنین در اختیار گذاشتن کوره کربوراسیون گازی Carbosib 202 به منظور صحت سنجی برنامه کامپیوتری تهیه شده، تشکر و قدردانی می شود.

نزدیک ۲/۵، تغییرات فشار در اکتیویته کربن تأثیر ناچیزی خواهد داشت.

- در هوای مرطوب نسبت به هوای خشک تحت شرایط یکسان، کاهش شدیدی در درصد کربن سطح و افزایش شدیدی در نقطه شبنم ایجاد می شود که میزان کاهش و افزایش در نسبت های هوا به سوخت کمتر و نزدیک به ۲/۵ شدیدتر از نسبت های بالاتر می باشد.
- برای جبران کاهش پتانسیل کربن کوره ناشی از افزایش رطوبت محیط، کاهش درجه حرارت کوره، افزایش فشار کاری کوره و کاهش نسبت هوا به سوخت مصرفی پیشنهاد می شود.
- در دماهای محیط بالای ۱۵ درجه سلسیوس نسبت به دماهای پایین تر (نزدیک صفر)، رطوبت باعث کاهش شدیدی در اکتیویته کربن می شود.
- در رطوبت های پایین تاثیر دمای محیط بر اکتیویته کربن سطح بسیار کمتر از رطوبت های بالا می باشد به

مراجع

1. Davis, J. R., (1991), "ASM Metals Handbook, Volume 4 – Heat Treating", pp. 325-338.
2. Chekanskii, V. V., (1985), "Gas Carburizing in an Atmosphere of Activated Endogas without Adding Excess Methane to the Furnace", *Chemicothermal Treatment*, 12, pp. 2-7.
3. Ju, D. Y., and Liu, C., and Inoue, T., (2003), "Numerical Modeling and Simulation of Carburized and Nitrided Quenching Process", *J. of Materials Processing Technology*, 143-144, pp. 880-885.
4. Ferguson, B. L., and Li, Z., and Freborg, A. M., (2005), "Modeling Heat Treatment of Steel Parts", *Computational Materials Science*, 34, pp.274-281.
5. Ferguson, B. L., and Freborg, A. M., and Petrus, G., and Callabresi, M. L., (2002), "Predicting the Heat-Treat Response of a Carburized Helical Gear", *Gear Technology*, pp.20-25.
6. Sundelöf, E., (2003), "Modelling of Reactive Gas Transport", *UniversitetsserviceUS AB*.
7. Sinha, V. K., and Prasad, R. S., and Mandal, A., and Maity, J., (2007), "A Mathematical Model to Predict Microstructure of Heat-Treated Steel", *J. of Materials Engineering and Performance*, 16(4), pp.461-469.
8. Karabelchtchikova, O., and Sisson, R. D., (2006), "A Numerical Analysis Based on Direct Flux Integration", *J. of Phase Equilibria and Diffusion*, 26, pp.598-604.
9. Karabelchtchikova, O., and Sisson, R. D., (2006), "Carburizing Process Modeling and Sensitivity Analysis using Numerical Simulation", *Proc. MS. &T., Cincinnati, OH*, pp.375-386.

10. Karabelchtchikova, O., and Sisson, R. D., (2006), "Calculation of Gas Carburizing Kinetic Parameters from Carbon Concentration Profiles Based on Direct Flux Integration ", Journal of Defect and Diffusion Forum, 266, pp.171-180.
11. Karabelchtchikova, O., and Sisson, R. D., (2007), "Thermodynamics of the Carburizing Atmospheres with Various Enriching Hydrocarbon Gases", J. of Metallurgical Transactions.
12. Karabelchtchikova, O., and Sisson, R. D., (2007), "Gas Consumption and Cost Model Optimization of the Gas Carburizing 'Boost' Stage", J. of Metallurgical Transactions.
13. Karabelchtchikova, O., and Sisson, R. D., (2006), "Effect of Surface Roughness on the Kinetics of Mass Transfer during Gas Carburizing", Int. J of Heat Treatment and Surface Engineering.
14. Karabelchtchikova, O., and Sisson, R. D., (2007), "Effect of Alloy Composition on Carburizing Performance of Steel ", J. of Metallurgical Transactions.
15. Karabelchtchikova, O., and Sisson, R. D., (2006), "Multi-Objective Optimization of Gas Carburizing Process in Batch Furnaces with Endothermic Carburizing Atmosphere", J. of Metallurgical Transactions.

۱۶. نمنی، ر.، (۱۳۷۷)، "محیط های کنترل شده در عملیات حرارتی"، ترجمه دکتر علی حائریان اردکانی و مهندس محمد مزینانی، چاپ اول، مشهد، دانشگاه فردوسی، ص ۸۱.

۱۷. سعیدی، ع.، و گاسکل، د.، (۱۳۸۱)، "مقدمه ای بر ترمودینامیک مواد"، جلد دوم، چاپ سوم، اصفهان، دانشگاه صنعتی، ص ۵۳۵.