

## ماکزیمم سازی ارزش حرارتی گاز سنتز در فرایند گازسازی واحترق ذغال سنگ با استفاده از نرم افزار THERMOFLOW

سید احسان مجتبی<sup>۱</sup>، مرتضی بقالها<sup>۲</sup>، داود رشتچیان<sup>۳</sup>

دانشگاه صنعتی شریف-دانشکده مهندسی شیمی و نفت  
[baghalha@sharif.edu](mailto:baghalha@sharif.edu)

### چکیده

مزیت مهم فرایند گاز سازی سوخته‌های جامد کربنی به گاز سنتز (syngas) نسبت به احتراق مستقیم را می توان قابلیت جداسازی ترکیبات خورنده ای که از واکنش سوخته‌های جامد ایجاد می شوند دانست. در این فرایند از تزریق هوا و یا اکسیژن به همراه بخار آب به داخل راکتور گازسازی (gasifier) برای گازسازی و احتراق سوخت استفاده می شود. در این مقاله شبیه سازی ترمودینامیکی این فرایند در gasifier بستر متحرک، توسط نرم افزار THERMOFLOW به منظور ماکزیمم سازی ارزش حرارتی syngas انجام شده است. مهمترین متغیرهای موثر در خواص شیمیایی و فیزیکی syngas را می توان میزان اکسیژن یا هوای ورودی و بخار آب ورودی به gasifier ذکر کرد. شبیه سازی ترمودینامیکی این فرایند نشان می دهد که افزایش دبی جرمی هوا و اکسیژن نسبت به دبی سوخت سبب کاهش ارزش حرارتی syngas و افزایش دمای آن می شود. در حالی که افزایش دبی جرمی بخار آب ورودی نسبت به دبی جرمی سوخت، سبب کاهش دما می شود. ولی ارزش حرارتی syngas ابتدا افزایش یافته سپس کاهش می یابد. بیشترین ارزش حرارتی syngas برابر  $17500 \text{ kJ/kg}$  از تزریق اکسیژن به نسبت  $0/25$  سوخت ورودی و به ازای نسبت  $0/6$  دبی جرمی بخار آب به دبی سوخت قابل دستیابی است.

واژه‌های کلیدی: گازسازی- احتراق- سوخت جامد - gasifier های بستر متحرک.

### ۱- مقدمه

فرآیند گازسازی (Gasification) به فرآیندی اطلاق می شود که طی آن سوخته‌های کربنی و یا هیدروکربنی اعم از سوخته‌های جامد و یا ترکیبات سنگین نفتی به گازهای قابل احتراق که دارای ارزش حرارتی هستند تبدیل می شوند. احتراق نیز به عنوان اصلی ترین بخش فرایند گازسازی به شمار می آید که در آن سوخته‌های کربنی با اکسیژن به طور کامل واکنش می دهند.

گازسازی سوخته‌های جامد کربنی بهترین راه برای کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و حذف ترکیبات مضر و خورنده از قبیل  $H_2S$  و  $CO_2$  از آنها به شمار می آید. در این فرآیند سوخته‌های جامد در داخل راکتور گازسازی که "Gasifier" نامیده می شود به گاز قابل احتراق که اصطلاحاً "Syngas" نامیده می شود تبدیل می شوند. syngas به طور عمده حاوی هیدروژن، کربن مونواکسید و متان با نسبت‌های متفاوت می باشد. هر سه این ترکیبات به خوبی قابلیت احتراق را دارا هستند.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، سیستم‌های انرژی

۲- استادیار دانشکده مهندسی شیمی و نفت- دانشگاه صنعتی شریف

۳- دانشیار دانشکده مهندسی شیمی و نفت- دانشگاه صنعتی شریف

از این تکنولوژی به صورت عمده در تولید انرژی الکتریکی در کشورهایی که دارای ذخایر ذغال سنگ فراوان هستند در قالب واحد (Integrated gasification combined cycle) IGCC استفاده می‌شود.

ذغال سنگ و بیوماس دو گروه عمده سوخت‌های جامد کربنی هستند که به صورت عمده توسط صنایع مختلف در دنیا بکار گرفته می‌شوند. سوخت‌های جامد کربنی ترکیبات پیچیده‌ای از پلیمرهای آلی به شمار می‌روند که به طور عمده از حلقه‌های آروماتیکی و هیدروکربنی و اتمهای دیگر از قبیل اکسیژن، نیتروژن، و سولفور تشکیل شده‌اند. در بیوماس نسبت کربن به هیدروژن برابر ۱۰، در ذغال سنگ از نوع Lignite این نسبت حوالی ۱۴ و در ذغال سنگ از نوع Anthracite نسبت کربن به هیدروژن حدوداً برابر ۳۰ می‌باشد. بیوماس به دلیل ناچیز بودن آلودگی  $CO_2$  ناشی از سوختن آن، درصد کم خاکستر و فراوانی آن نسبت به ذغال سنگ دارای برتری است و از طرفی دارای معیایی از قبیل درصد بالای رطوبت، آلکالی (Na,K) و کلر می‌باشد. بدیهی است که رطوبت زیاد آن انرژی بیشتری را برای خشک شدن طلب می‌کند و درصد بالای آلکالی و کلر آن نیز خوردگی در بویلرها و gasifier ها را افزایش می‌دهد [۱].

مهمترین خصوصیات سوخت‌های جامد را می‌توان توزیع اندازه ذرات و تخلل ذرات نام برد. اغلب محفظه‌های احتراق و gasifier ها با اندازه ذرات ذغال سنگ در محدوده  $10^{-6}$  تا  $10^{-2}$  متر به خوبی کار می‌کنند. نیمی از حجم ذرات را تخلل تشکیل می‌دهد. سطح ویژه ذرات ذغال سنگ ورودی به gasifier حدود  $500 \text{ m}^2/\text{g}$  می‌باشد [۲ و ۱].

در هنگام گرم شدن سوخت‌های جامد با افزایش دما یک سری از فعل و انفعالات شیمیایی روی آنها انجام می‌شود. خصوصیات و ترتیب این فرآیندهای شیمیایی به ساختار فیزیکی و شیمیایی سوخت و شرایط محیطی نمونه از قبیل دما و فشار بستگی دارد. به صورت کلی این مراحل را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود. مرحله اول خشک شدن ذرات جامد می‌باشد که در این مرحله آب به صورت بخار از ذرات جامد جدا می‌شود. مرحله بعد پیرولیز یا جداسازی مواد فرار (devolatilization) می‌باشد که در طی این مرحله گازهایی مانند  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$  و گازهای سنگین‌تر همانند tar به محیط آزاد می‌شوند. علاوه بر آن واکنش‌های مهمی نیز در داخل ذرات به وقوع می‌پیوندد. جداسازی مرحله آخر فعل و انفعالات ذرات سوخت در اثر حرارت به شمار می‌رود که طی آن ذرات جامد با گازهای اطراف وارد واکنش می‌شوند؛ احتراق ذرات جامد نیز یکی از قسمتهای فرآیند جداسازی به شمار می‌رود.

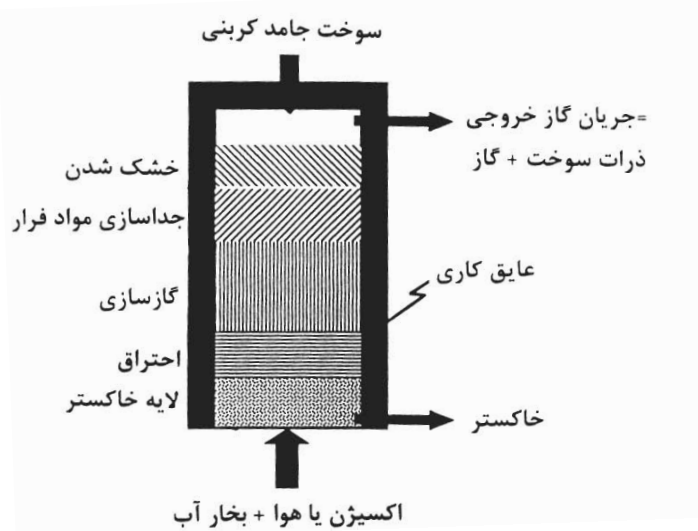
فرآیند جداسازی ذرات جامد به وسیله انتقال حرارت یا واکنش‌های شیمیایی و یا ترکیبی از ایندو انجام می‌شود. در بعضی از منابع جداسازی مواد فرار را نیز همانند احتراق به عنوان بخشی از فرآیند جداسازی به شمار می‌آورند. این امر به این دلیل است که در یک واکنش واقعی حداقل در زمانهایی ممکن است مراحل جداسازی مواد فرار احتراق و جداسازی به صورت همزمان اتفاق بیافتند.  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$  مهمترین محصولات فرآیند جداسازی به شمار می‌روند که همگی قابلیت سوختن دارند. از آنجا که سوخت‌های جامد اغلب حاوی مقادیری از S, O, N, H می‌باشند و این عناصر به عنوان مواد اولیه در واکنش‌ها شرکت می‌کنند. محصولات متنوع زیادی در فرآیند جداسازی بدست می‌آید که اغلب یک اکسیژن کمتر از فرم طبیعی خود دارند.  $H_2S$  و  $COS$  به دلیل خوردگی بالا یکی از مزاحمترین ترکیبات حاصل از جداسازی به شمار می‌روند که درست بعد از واحد جداسازی توسط واحد مجزا و جداگانه Gas cleanup از syngas جدا می‌شوند. [۲ و ۳]

فرآیند جداسازی و احتراق سوخت‌های جامد عمدتاً از طریق سه تکنیک بستر متحرک (moving bed), بستر سیال (Fluidized bed) و انتقال پنوماتیکی (Pneumatic transport) انجام می‌شود. به دلیل عدم وجود مقادیر بهینه نسبت اکسیژن و بخار آب در مقالات، این مقاله به شبیه سازی و بهینه سازی گازسازی و احتراق در gasifier های بستر متحرک می‌پردازد.

## ۲- مدل سازی Gasifier های بستر متحرک

Gasifier و محفظه‌های احتراق بستر متحرک سالهاست به دلیل سادگی و کنترل مناسب که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا مطالعات زیادی راجع به این موضوع در مقالات به چشم می‌خورد. یکی از بهترین بررسی‌های انجام شده در این زمینه را Hobbs و همکارانش انجام داده‌اند. [۳] شکل (۱) نمای شماتیک یک gasifier که از روش بستر متحرک استفاده

می‌کند را نشان داده است. ذرات جامد سوخت که در مرحله قبل اندازه آنها توسط آسیاب‌ها به اندازه کافی کوچک شده است از بالای gasifier وارد شده و به آرامی به سمت پایین راکتور یعنی جایی که خاکستر ذغال قرار دارد حرکت می‌کند. گاز مورد نیاز برای گازسازی و احتراق نیز (که معمولاً هوا و بخار می‌باشد) از یک توزیع کننده در پایین gasifier به آن تزریق می‌شود. ذرات ذغال سنگ در حین پایین رفتن فرآیندهای خشک شدن، جداسازی مواد فرار، گازسازی و احتراق را به ترتیب پشت سر می‌گذارند. البته در داخل gasifier محدوده مشخصی بین این فرآیندها وجود ندارد. برای مثال در مورد یک ذره سوخت، ممکن است در لایه بیرونی آن عملیات جداسازی مواد فرار در حال انجام باشد و در لایه‌های درونی عملیات خشک شدن انجام گیرد و یا ممکن است یک ذره به صورت همزمان تحت عملیات گازسازی، جداسازی مواد فرار و احتراق قرار داشته باشد.

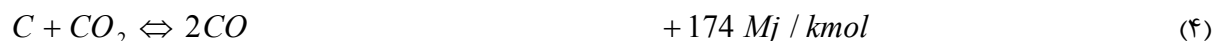


شکل ۱: نمای شماتیک یک gasifier از نوع بستر متحرک

گازی که از پایین gasifier به سمت بالا حرکت می‌کند با ذرات سوخت واکنش داده و تغییرات اساسی در ترکیب و دمای آن رخ می‌دهد. اکسیژن موجود در این گاز در لایه‌های پایین بستر و در ناحیه احتراق به طور کامل به مصرف می‌رسد. در نتیجه غلظت  $CO_2$  افزایش می‌یابد. در این ناحیه به دلیل انجام واکنش احتراق کربن و گرمازا بودن آن دمای بستر به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. واکنش‌های انجام شده در ناحیه احتراق عبارتند از: [۲]



درست بعد از این ناحیه  $H_2O, CO_2$  تولید شده با کربن در فاز جامد واکنش داده و تولید  $H_2$  و  $CO$  می‌نمایند. به دلیل اینکه این واکنشها گرماگیر هستند دمای بستر رفته رفته کاهش می‌یابد. (شکل ۲)



در همین زمان محصولات واکنش نیز با یکدیگر واکنش داده و سبب تغییرات بیشتر در ترکیب فاز گاز می‌شوند. یکی از مهمترین این واکنشها، واکنش انتقالی است که به صورت زیر انجام می‌شود:



انجام واکنش (۶) یک واکنش نامطلوب تلقی می‌شود زیرا  $CO$  در جریان آن به  $CO_2$  و  $H_2$  تبدیل شده که تنها هیدروژن دارای قابلیت سوختن می‌باشد و گرمای حاصل از احتراق آن نیز کمتر از  $CO_2$  می‌باشد (جدول ۱). واکنشهایی که پس از ناحیه احتراق انجام می‌شوند، عمدتاً گرماگیر هستند و این امر سبب کاهش دمای بستر پس از ناحیه احتراق می‌شود.

متان نیز یکی از ترکیبات مهم و مورد نظر در syngas به شمار می‌رود. که به طور عمده حاصل واکنش جداسازی مواد فرار می‌باشد. اهمیت متان از آن جهت است که دارای گرمای احتراق بیشتری نسبت به کربن منواکسید و هیدروژن می‌باشد و افزایش درصد آن در گاز خروجی از gasifier سبب افزایش ارزش حرارتی syngas می‌شود. (جدول ۱) مهمترین واکنشی که منبع تولید متان در gasifier به شمار می‌رود واکنش زیر می‌باشد:



همانطور که از واکنش بالا مشخص است هر دو مول گاز هیدروژن ماده اولیه به یک مول گاز محصول متان تبدیل می‌شود، لذا بالا بردن فشار محفظه احتراق سبب افزایش مقدار متان در گاز خروجی می‌شود.

جدول ۱: گرمای حاصل از احتراق ترکیبات اشتعال پذیر در syngas [۴]

	MJ/kg بر حسب	MJ/kmol بر حسب
CO	۱۰/۱۲	۲۸۳/۴۸
H <sub>2</sub>	۱۲۰/۲۳	۲۴۰/۴۶
CH <sub>4</sub>	۵۰/۱۲	۸۰۱/۹۲

### ۳- شبیه سازی فرایند گازسازی و احتراق توسط نرم افزار THERMOFLOW

گازسازی سوخته‌های جامد از بخش‌های متعددی از قبیل خشک کردن، جدا سازی مواد فرار، گازسازی و احتراق تشکیل شده است که هر یک از این قسمت‌ها از پدیده‌هایی متعددی از قبیل واکنش‌های هموزن و غیر هموزن، انتقال حرارت، جرم، مومنتوم، ساییدگی ذرات و ... تشکیل شده است. لذا مدل‌های ترمودینامیکی و سینتیکی متعددی جهت فرایند گازسازی و احتراق سوخته‌های جامد توسعه پیدا کرده اند [۶،۵]. نرم افزار THERMOFLOW یکی از قویترین نرم افزارها در شبیه سازی فرایند گازسازی و احتراق سوخته‌های جامد در قالب واحد IGCC به شمار می‌رود. اصول شبیه سازی این نرم افزار بر پایه برقراری تعادل ترمودینامیکی در سیستم استوار می‌باشد. لذا شبیه سازی فرایند گازسازی و احتراق توسط این نرم افزار یک شبیه سازی ترمودینامیکی می‌باشد.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی ذغال سنگ از نوع Pennsylvania Anthracite

آنالیز	مقادیر % (بر مبنای مرطوب)
رطوبت	۱/۸
کربن ثابت	۸۲/۶
هیدروژن	۲/۳۹۹
نیتروژن	۰/۹
اکسیژن	۱/۸۰۱
کلر	۰
گوگرد	۰/۸
خاکستر	۹/۷
LHV @25°C	۲۷۹۶۴ (kJ/kg)
HHV @25°C	۳۰۳۳۲ (kJ/kg)

در این مقاله شبیه سازی فرایند برای gasifier عمودی از نوع بستر متحرک با فشار ثابت ۲۶/۸۹ بار انجام می‌شود. اتلاف حرارتی از بدنه gasifier و کربن نسوخته در خاکستر خروجی از آن برابر صفر فرض شده است. سوخت جامد مورد نظر ذغال سنگ از نوع Pennsylvania Anthracite با مشخصات مندرج در جدول (۲) می‌باشد.

به صورت کلی دو روش تزریق هوا و تزریق اکسیژن برای تامین اکسیژن مورد نیاز برای احتراق در واحد گاز سازی وجود دارد. از آنجا که ارزش حرارتی syngas، در حالتی که به gasifier هوا تزریق می شود، برای کاربردهایی که دمای شعله بالا مورد نیاز است، کافی نیست از تزریق مستقیم اکسیژن به محفظه احتراق استفاده می شود. برای این منظور از واحد جدا سازی هوا برای جداسازی اکسیژن و نیتروژن استفاده می شود. در این مقاله اثرات تزریق اکسیژن به راکتور نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

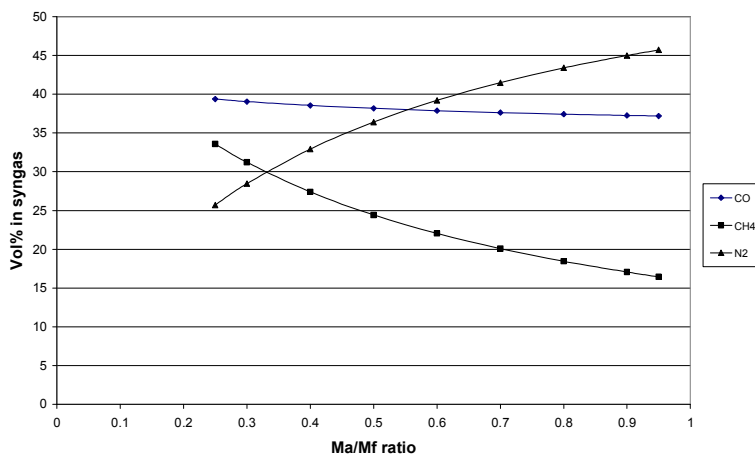
#### ۴- نتایج شبیه سازی

در این مطالعه اثرات تغییر دبی جرمی هوا (Ma)، دبی جرمی اکسیژن (Mo) و دبی بخار آب ورودی (Ms) نسبت به دبی سوخت ورودی (Mf) به gasifier روی ترکیب شیمیایی syngas و ارزش حرارتی آن به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.

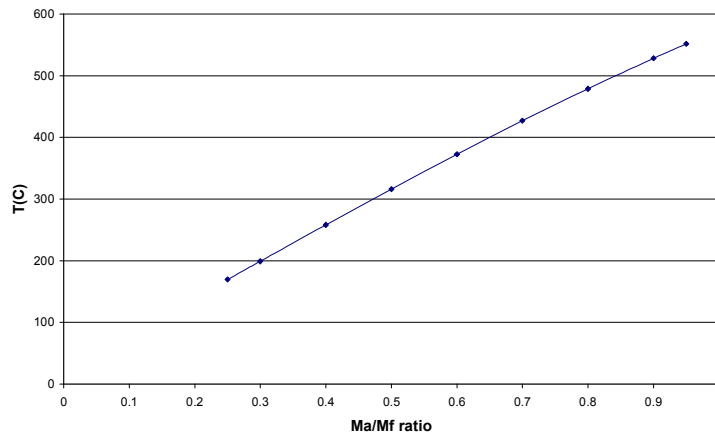
تزریق هوا به gasifier به دلیل عدم نیاز به واحد جداسازی اکسیژن دارای هزینه سرمایه گذاری و عملیاتی کمتری است. ولی در عوض به دلیل اینکه نزدیک به ۷۹ درصد هوای ورودی را نیتروژن تشکیل داده است و فاقد ارزش حرارتی می باشد سبب کاهش ارزش حرارتی syngas، افزایش حجم تجهیزات و کاهش بازده حرارتی عملیات گازسازی می شود. لذا تنظیم مقدار اکسیژن ورودی مستلزم انجام یک عملیات بهینه سازی می باشد. در این قسمت تغییرات خواص شیمیایی و فیزیکی syngas با تغییر در نسبت  $M_a / M_F$  در حالی که دبی جرمی بخار ورودی به دبی جرمی سوخت ثابت و برابر ۰/۱ فرض شده است بررسی می شود.

با افزایش درصد هوای ورودی به gasifier دبی جرمی گازهای عبوری و خروجی از gasifier افزایش می یابد. لذا درصد مولی  $CO, CH_4$  در گاز خروجی کاهش و درصد مولی نیتروژن افزایش می یابد (نمودار ۱). با کاهش درصد مولی گازهای  $CO, CH_4$  ارزش حرارتی syngas نیز کاهش می یابد. (نمودار ۳) به طوری که بیشترین ارزش حرارتی قابل دستیابی در این حالت برابر  $15800 \text{ kJ/kg}$  می باشد که در نسبت  $M_a / M_F = 0.25$  مشاهده می گردد. با افزایش درصد هوای ورودی به gasifier مقدار اکسیژن تزریق شده به ناحیه احتراق نیز افزایش یافته و سبب افزایش شدت واکنشهای (۱) تا (۳) می شود و دمای گاز خروجی را افزایش می یابد (نمودار ۲).

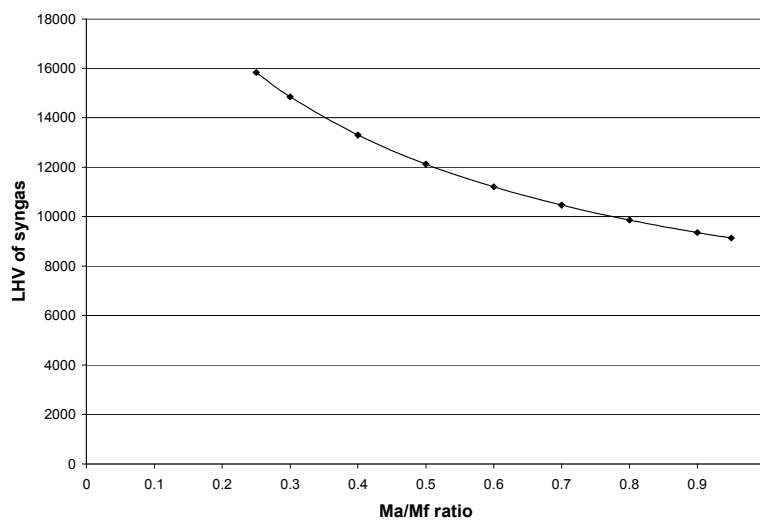
مهمترین منابع تولید هیدروژن در فرایند گازسازی واکنشهای (۵) و (۶) می باشند. واکنش (۶) به دلیل کم بودن مقدار آب به مقدار بسیار کمی انجام می شود. (به همین دلیل مقدار  $CO_2$  در گاز خروجی تقریباً برابر صفر می باشد) هیدروژن تولید شده از واکنش (۵) نیز توسط واکنش (۶) به مصرف رسیده و صرف تولید متان می شود. از اینرو در این قسمت میزان هیدروژن موجود در syngas ناچیز می باشد.



نمودار ۱: تغییرات درصد مولی  $CH_4, CO, N_2$  در syngas با تغییر در نسبت وزنی هوا به کرین  $Ma/Mf$



نمودار ۲: تغییرات دمای syngas با تغییر در نسبت وزنی هوا به کربن Ma/Mf

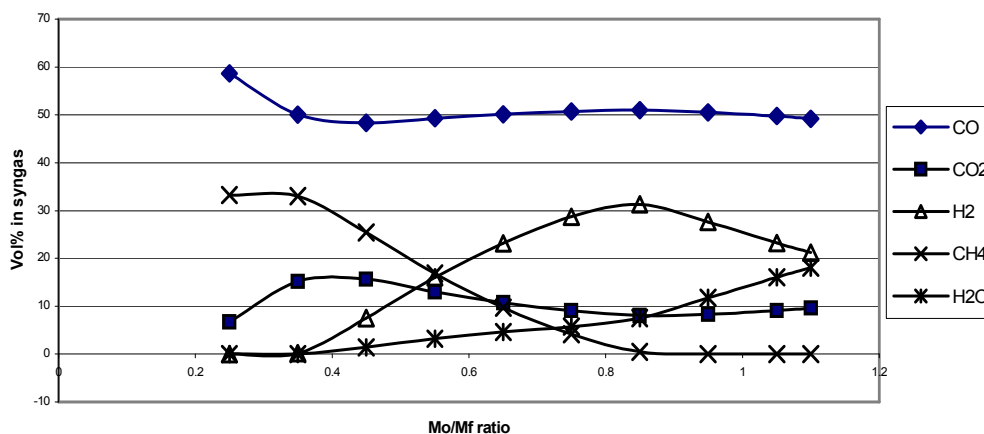


نمودار ۳: تغییرات ارزش حرارتی syngas با تغییر در نسبت وزنی هوا به کربن Ma/Mf

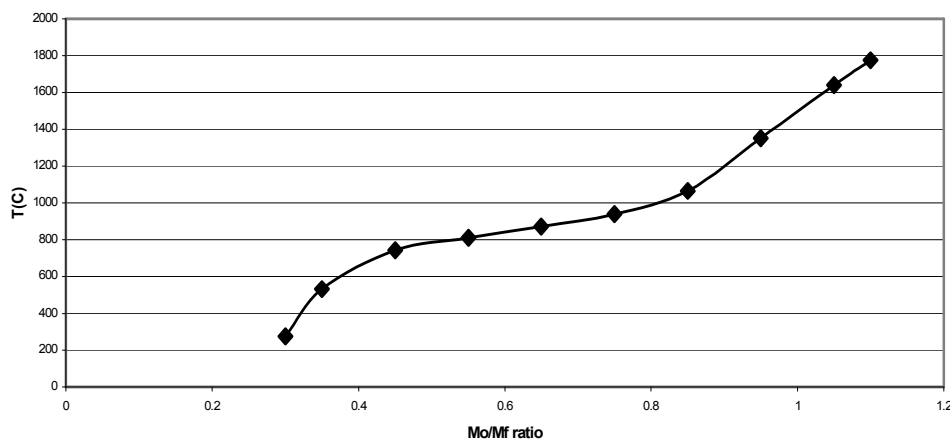
معمولاً در مصارفی که از syngas برای احتراق و ایجاد دمای شعله بالا استفاده می شود، نیاز است که به جای هوا اکسیژن به داخل gasifier تزریق شود. این کار سبب افزایش ارزش حرارتی syngas می شود. (نمودار ۳ و ۶) در این قسمت تغییرات خواص شیمیایی و فیزیکی syngas با تغییر در نسبت  $M_O / M_F$  در حالی که دبی جرمی بخار ورودی به دبی جرمی سوخت ثابت و برابر  $0/6$  فرض شده است بررسی می شود.

همانطور که نمودار (۴) نشان می دهد، در ابتدا به دلیل غلظت کم اکسیژن در بستر، تمامی ذرات کربن در قسمت احتراق با اکسیژن واکنش نمی کنند و بخشی از این ذرات صرف تولید متان توسط واکنش (۷) می شوند. با افزایش میزان اکسیژن تمامی ذرات کربن در ناحیه احتراق به مصرف می رسند و این امر باعث افزایش غلظت  $CO$  و  $CO_2$  در طبقات مختلف بستر می گردد. در نتیجه سرعت رفت واکنش (۶) افزایش یافته و میزان هیدروژن موجود در گاز خروجی را تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می دهد. پس از این نقطه ماکزیمم، غلظت زیاد هیدروژن و دمای بالای بستر در نسبت  $M_O / M_F = 0/85$  سبب تولید آب توسط واکنش (۳) شده و این امر کاهش غلظت هیدروژن و افزایش درصد مولی آب در syngas را به همراه دارد. (نمودار ۴) از طرف دیگر افزایش اکسیژن در ناحیه احتراق سبب می شود که غلظت ذرات کربن واکنش نکرده کم شده و رفته رفته به صفر برسد. با کمتر شدن ذرات کربن، تولید متان نیز توسط واکنش (۷) کم شده و در نسبتهای بالای اکسیژن تزریقی، مقدار آن در syngas به صفر می رسد. با افزایش اکسیژن و کاهش متان ارزش حرارتی گاز خروجی نیز کاهش می یابد. (نمودار ۶) بیشترین ارزش حرارتی قابل دستیابی در این حالت برابر  $17500 \text{ kJ/kg}$  می باشد که در نسبت  $M_O / M_F = 0/25$  مشاهده می گردد.

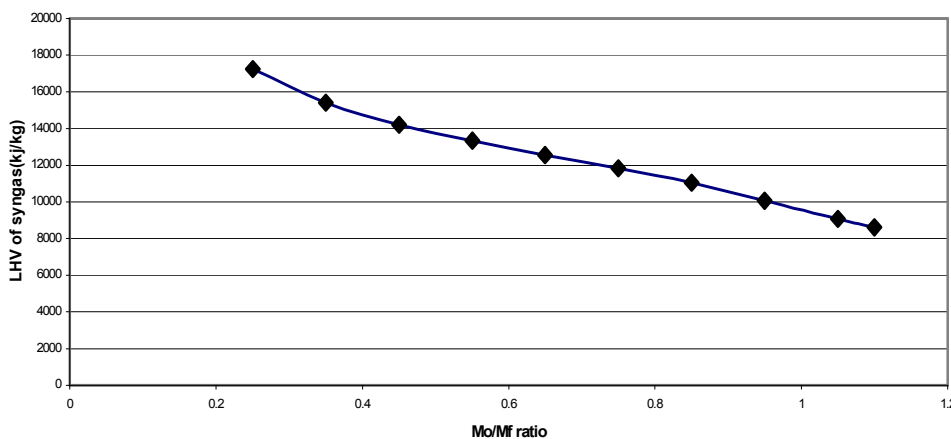
تغییرات درصد مولی  $CO$  و  $CO_2$  در syngas نیز برخلاف یکدیگر انجام می شود (نمودار ۴). بدین معنی که افزایش  $CO_2$  به معنای کاهش  $CO$  و برعکس می باشد. دلیل این امر این است که مصرف  $CO$  به معنای تولید  $CO_2$  توسط واکنش (۶) می باشد. با افزایش اکسیژن واکنشهای (۱) تا (۳) نیز با شدت بیشتری انجام می شوند و به دلیل گرمازا بودن، سبب افزایش دمای syngas می شوند.



نمودار ۴: تغییرات درصد مولی  $CH_4, CO, H_2, CO_2, H_2O$  در syngas با تغییر در نسبت وزنی اکسیژن به کربن Mo/Mf



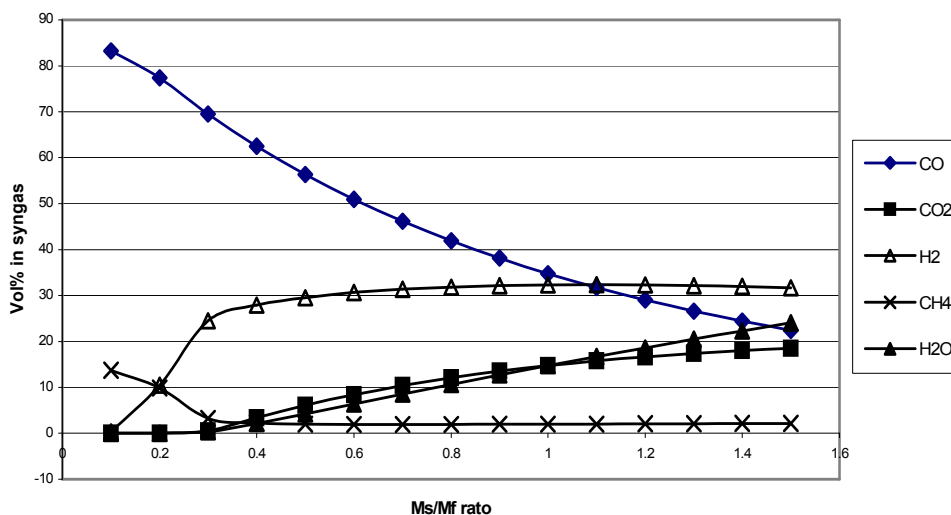
نمودار ۵: تغییرات دمای syngas با تغییر در نسبت وزنی اکسیژن به کربن Mo/Mf



نمودار ۶: تغییرات ارزش حرارتی syngas با تغییر در نسبت وزنی اکسیژن به کربن Mo/Mf

آب به عنوان یکی از مواد اولیه برای تولید  $H_2$  و  $CO$  (واکنش ۵) از اهمیت بالایی برخوردار است. ولی افزایش بیش از حد آن نیز می تواند اثرات نامطلوبی در برداشته باشد. نمودارهای (۷) تا (۹) اثرات ناشی از افزایش مقدار  $M_S / M_F$  را روی خواص شیمیایی و فیزیکی syngas در نسبت ثابت دبی جرمی اکسیژن به دبی سوخت برابر  $0/8$  مورد بررسی قرار می دهد. افزایش بخار آب سبب کاهش درصد مولی  $CO$  و افزایش درصد مولی  $H_2$  و  $CO_2$  در syngas می شود (نمودار ۷). این سه رویداد ناشی از افزایش سرعت رفت واکنش انتقالی (واکنش ۶) میباشد که باعث تولید  $H_2$  و  $CO_2$  و مصرف  $CO$  می شود. همزمان با افزایش سرعت رفت واکنش (۶)، سرعت رفت واکنش (۵) نیز به دلیل افزایش غلظت اکسیژن در بستر افزایش یافته و سبب می شود میزان ذرات کربن واکنش نکرده برای واکنش با هیدروژن در بستر کم شود و این امر باعث کاهش مقدار متان در گازهای خروجی می شود.

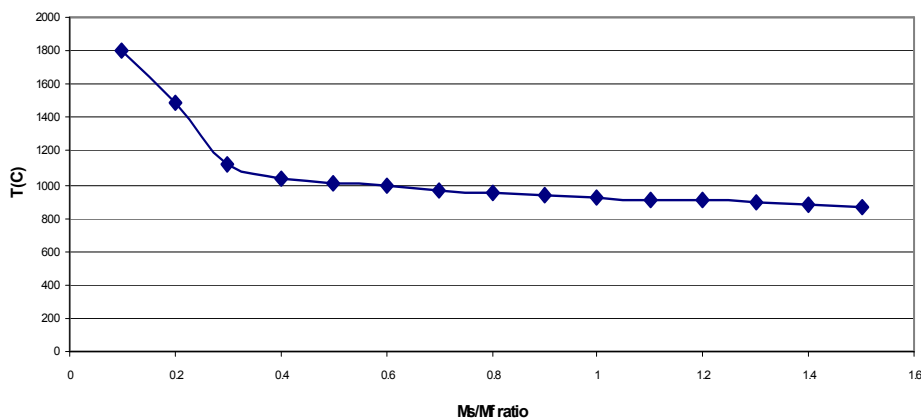
از آنجا که واکنش تولید متان از واکنش انتقالی گرمای بیشتری را آزاد میکند، با کم شدن سرعت واکنش (۷) دمای syngas به سرعت کاهش می یابد (نمودار ۸). ولی پس از نسبت  $M_S / M_F = 0/4$  کاهش دمای syngas با سرعت کمتری انجام می شود و دلیل این امر گرمازا بودن واکنش انتقالی است که از افت شدید دمای syngas به دلیل افزایش مقدار آب در آن جلوگیری می کند.



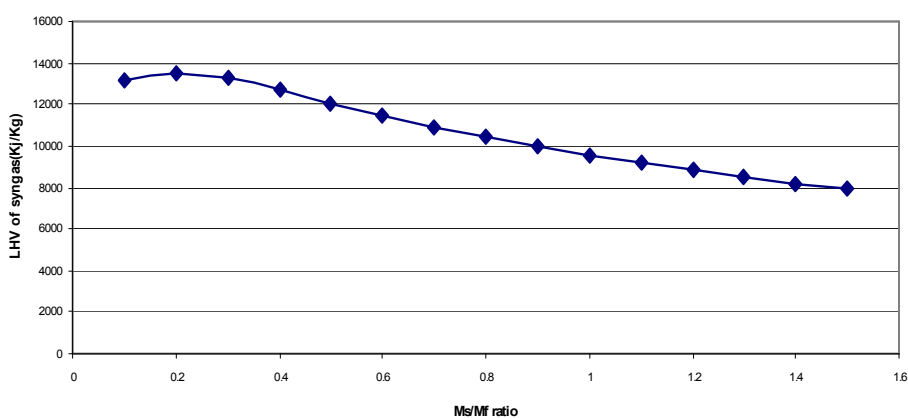
نمودار ۷: تغییرات درصد مولی  $H_2O, H_2, CO, CH_4, CO_2$  در syngas با تغییر در نسبت وزنی بخار به کربن  $M_S / M_F$

نمودار (۹) کاهش ارزش حرارتی گازهای خروجی را با افزایش میزان بخار آب ورودی نشان می دهد. افزایش میزان آب در syngas (که فاقد ارزش حرارتی می باشد) و کاهش مقدار  $CO$  و  $CH_4$  مهمترین عوامل کاهش میزان ارزش حرارتی syngas به شمار می روند. همانطور که در نمودار (۹) مشخص است ارزش حرارتی syngas در نسبت  $M_S / M_F = 0/2$  برابر  $13469 \text{ kJ/kg}$  و در نسبت  $M_S / M_F = 0/1$  برابر  $13207 \text{ kJ/kg}$  می باشد. این افزایش ارزش حرارتی به دلیل افزایش سریع مقدار هیدروژن در گاز خروجی می باشد که کاهش متان در نسبتهای بالاتر بخار در نهایت باعث کاهش آن در گاز سنتز می شود.





نمودار ۸: تغییرات دمای syngas با تغییر در نسبت وزنی بخار به کربن Ms/Mf



نمودار ۹: تغییرات ارزش حرارتی syngas با تغییر در نسبت وزنی بخار به کربن Ms/Mf

## ۵- نتیجه گیری

مهمترین مشکل استفاده از سوخته‌های جامد، وجود ترکیبات بسیار خورنده در گازهای حاصل از احتراق آنها می باشد. از اینرو گازسازی سوخته‌های جامد روشی کار آمد برای حذف گازهای خورنده حاصل از احتراق سوخته‌های جامد و تولید گاز سنتز با قابلیت اشتعال مناسب به شمار می رود. مهمترین هدف این فرایند تولید یک گاز قابل اشتعال با ارزش حرارتی بالا و عاری از ترکیبات خورنده می باشد. مهمترین عوامل موثر در تعیین ارزش حرارتی گاز سنتز را می توان میزان اکسیژن یا هوای ورودی به gasifier و میزان بخار آب ورودی به آن دانست. شبیه سازی ترمودینامیکی این فرایند توسط نرم افزار THERMOFLOW نشان می دهد که افزایش دبی جرمی هوا و اکسیژن نسبت به دبی سوخت سبب کاهش ارزش حرارتی syngas و افزایش دمای آن شده و افزایش دبی جرمی بخار آب ورودی نسبت به دبی جرمی سوخت، سبب کاهش دما می شود. ولی ارزش حرارتی syngas ابتدا افزایش یافته سپس کاهش می یابد. بیشترین ارزش حرارتی syngas برابر ۱۷۵۰۰ kJ/kg از تزریق اکسیژن به نسبت ۰/۲۵ سوخت ورودی و به ازای نسبت ۰/۶ دبی جرمی بخار آب به دبی سوخت قابل دستیابی است.

## مراجع

- 1- Higman C., Van der Burgt M., "Gasification", New York, Elsevier science, 2003.
- 2- Marcio L. de Souza-Santos, "Solid fuels combustion and gasification", New York, Marcel Dekker, Inc., 2004
- 3- Hobbs, M.L., Radulovic, P.T., Smoot, L.D., "Combustion and gasification of coals in fixed-beds", prog. Energy Combust.sci, 19 505-556, 1993
- 4- Perry, Green, "Perry's chemical engineer's Handbook", 6th, ed., McGraw-Hill, 1984.
- 5- jen, L.C., de Souza-Santos, M.L., "Modeling and simulation of fixed-bed gasifier for charcoal", chemical engineering journal, vol.7, 3-4, pp 18-23 1984
- 6- Mann M., Knutson R., Erjavec J., Jacobsen J., "Modeling reaction kinetics of steam gasification for transport gasifier", Fuel, 83: 1643-1650 2004.