



## گازی سازی زیست توده باگاس نیشکر در راکتور بستر ثابت فروکشند: مدل تعادلی و پتانسیل تولید گاز سنتز

سیدهاشم صمدی<sup>۱</sup>، برات قبادیان<sup>۲\*</sup> محسن نصرتی<sup>۳</sup>، مهدی رضایی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی شیمی، بیوتکنولوژی، دانشگاه تربیت مدرس.

۴- کارشناس ارشد انرژی، گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشگاه نیرو، پژوهشگاه انرژی و محیط زیست.

\* ایمیل نویسنده مسئول: [ghobadib@modares.ac.ir](mailto:ghobadib@modares.ac.ir)

### چکیده

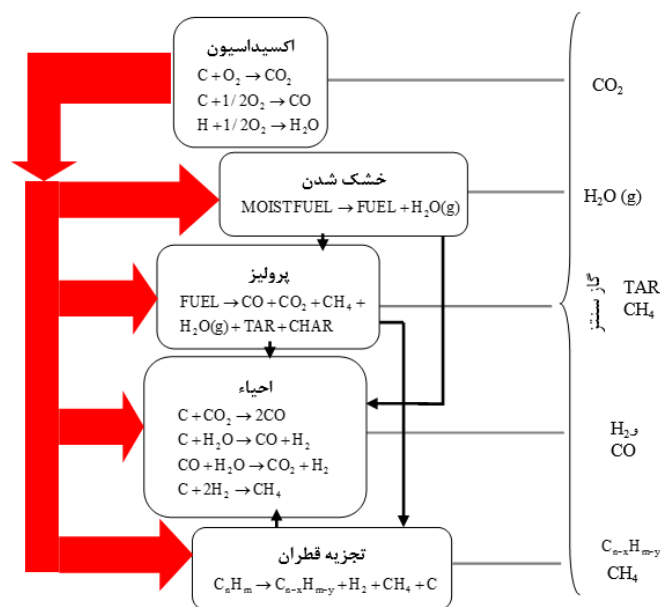
انرژی زیست توده دارای پتانسیل بسیار خوبی برای ایجاد تاثیرات قابل توجهی در مبرم‌ترین چالش‌های توسعه فقر روستایی و آسیب‌های زیست محیطی است. منابع کشاورزی ایران دارای توان بالقوه برای تولید یک منبع پایدار از زیست توده می‌باشد. یکی از روش‌های تولید انرژی پایدار زیست توده، گازی‌سازی می‌باشد. گازی‌سازی یکی از روش‌های امیدوار کننده می‌باشد، که در آن ضایعات مواد اولیه و زیست توده به گاز سنتز تبدیل می‌شود. باگاس نیشکر یکی از زائدات حاصل از برداشت نیشکر و پسماندهای تولید تصفیه نیشکر است که در مناطق کشت نیشکر در استان خوزستان در ایران به وفور یافت می‌شود. لذا در این تحقیق به توسعه یک مدل تعادلی برای گازی‌ساز فروکشند با خوراک اولیه باگاس نیشکر به منظور شبیه سازی فرایند تولید گاز سنتز پرداخته می‌شود. تعادل جرم و انرژی از گازی‌ساز محاسبه شد و ترکیب گاز سنتز، ارزش حرارتی پایینی و بازده گاز سرد پیش بینی شده بود. نتایج مدل نشان داد که ارزش حرارتی پایینی گاز تولید شده با افزایش رطوبت در باگاس نیشکر کاهش می‌یابد. بازده گاز سرد در رطوبت ۱۰٪ دارای بیشینه مقدار ۳۰/۳۵٪ بوده است. همچنین ارزش حرارتی و بازده گاز سرد با افزایش دمای گازی‌ساز کاهش می‌یابد. در محدوده دمای مورد مطالعه و رطوبت ۱۰٪ ارزش حرارتی گاز تولیدی و بازده گاز سرد به ترتیب  $۸-۴/۶ \text{ MJ/Nm}^3$  و ۴۰/۱-۲۴/۶۸٪ بدست آمد.

**کلمات کلیدی:** باگاس نیشکر، زیست توده، مدل تعادلی، گازی‌سازی.

مقدمه

زیست توده<sup>۱</sup>، یکی از مهم‌ترین منابع انرژی پس از ذغال سنگ، نفت و گاز طبیعی در سراسر جهان می‌باشد. بیوانرژی یا انرژی حاصل از زیست‌توده به طور گسترده می‌تواند به عنوان یک گزینه قابل دوام برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی استفاده شود (Gohil *et al.*, 2015). کاهش سوخت‌های فسیلی و تلاش دولت‌مردان برای کاهش تولید گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub>، انگیزه محققان را برای یافتن سوخت‌های جایگزین به نسبت پاک، فراوان و کربن خنثی افزایش داده‌است. اعتقاد بر این است که ۶۰٪ از اثر گازهای گلخانه‌ای از انتشار CO<sub>2</sub> و از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی حاصل می‌شود (IEA, 2015).

گازی‌سازی<sup>۲</sup> زیست‌توده در سال‌های اخیر با انواع مختلف زیست‌توده از قبیل بقایای نیشکر، کاه گندم، زائدات چوبی و ... انجام شده است (Luque and Speight, 2014). گازی‌سازی می‌تواند به طور بالقوه کارآمدتر از احتراق مستقیم سوخت به دلیل (۱) سوختن در دمای بالاتر (۲) استفاده از گازهای سنتز در سلول‌های سوختی (۳) تولید هیدروژن و اتانول از گاز سنتز (۴) تولید محدوده وسیعی از سوخت‌ها توسط فرآیند فیشر-تروپش<sup>۳</sup> باشد (NNFCC, 2009). مراحل اصلی فرایند گازی‌سازی در شکل (۱) نشان داده شده است (Molino *et al.*, 2015).

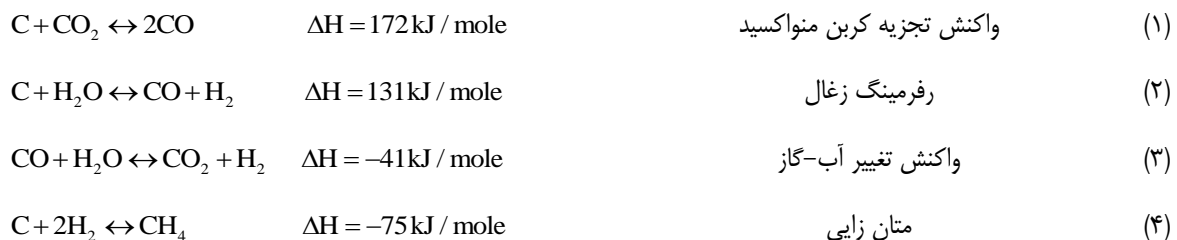


شکل ۱- مراحل اصلی فرایند گازی‌سازی.

اکسیداسیون بخشی از زیست توده برای به دست آوردن انرژی حرارتی مورد نیاز در راستای فرآیندهای گرماده، برای حفظ درجه حرارت عملیاتی به مقدار مورد نیاز، ضروری می‌باشد. اکسیداسیون در شرایط کمبود اکسیژن نسبت به حالت استوکیومتری به منظور اکسید تنها بخشی از سوخت انجام می‌شود. محصول اصلی این مرحله، انرژی حرارتی لازم برای کل فرایند می‌باشد، در حالی که

- 1- Biomass
- 2- Gasification
- 3- Fischer-Tropsch (FT)

محصول احتراق آن مخلوطی از گازهای CO، CO<sub>2</sub> و آب است. در این مخلوط اگر اکسیداسیون زیست توده با هوا انجام شود، گاز نیتروژن نیز می‌تواند وجود داشته باشد. خشک شدن عبارت است از تبخیر رطوبت موجود در مواد اولیه. مقدار گرمای مورد نیاز در این مرحله متناسب با رطوبت مواد خام می‌باشد. به طور کلی گرمای مورد نیاز، از مراحل دیگر فرایند گرفته می‌شود. خشک شدن می‌تواند به طور کامل در درجه حرارت ۱۵۰ سلسیوس انجام شود (Hamelinck *et al.*, 2004). مرحله بعدی پرولیز می‌باشد. این مرحله شامل تجزیه ترموشیمیایی مواد کربن‌دار، به طور خاص شکستن پیوندهای شیمیایی و تشکیل مولکول‌هایی با وزن مولکولی پایین‌تر می‌باشد. در اثر پرولیز بخش‌های مختلفی از مواد جامد، مایع و گاز تشکیل می‌شود. این بخش شامل مواد بی اثر موجود در زیست توده در قالب خاکستر و محتوای کربن بالا، به نام زغال<sup>۱</sup> می‌باشد. بخش مایع، به طور معمول قطران نامیده می‌شود که از مواد آلی پیچیده که در دمای پایین قابل تراکم است، تشکیل یافته است. بخش گازی به طور معمول ۷۰-۹۰wt% از مواد تغذیه شده را تشکیل می‌دهد که مخلوطی از گازهای غیر قابل تراکم در دمای محیط می‌باشند. بخش گازی "گاز پرولیز" نامیده می‌شود و به طور عمده از هیدروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن و هیدروکربن‌های سبک مانند متان و دیگر هیدروکربن شامل C<sub>2</sub> و C<sub>3</sub>، ترکیبات جزئی گازهای اسیدی و یا بی‌اثر تشکیل یافته است. واکنش پرولیز در محدوده درجه حرارت ۷۰۰-۲۵۰ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد و واکنش گرماگیر می‌باشد و همانند مرحله خشک شدن، گرمای مورد نیاز خود را از مرحله اکسیداسیون می‌گیرد. مرحله احیاء تمامی محصولات پرولیز و اکسیداسیون را درگیر واکنش می‌کند. واکنش مخلوط گاز و زغال منجر به تشکیل گاز سنتز نهایی می‌شود. این واکنش‌ها به صورت زیر می‌باشد (Roos, 2010):



تحقیق‌های مختلفی بر روی گازی‌سازی زیست‌توده و بررسی انرژی آن از جمله گازی‌سازی بربکت و تراشه چوب با گازی‌سازی بستر سیال (Lundberg *et al.*, 2016)، گازی‌سازی چوب کنجد بدست آمده از ضایعات صنعت مبل‌سازی با استفاده از گازی‌سازی بستر ثابت فروکشند<sup>۲</sup> (Sharma and Sheth, 2016)، گازی‌سازی ترکیبی از ضایعات جنگلی، خاک اره صنوبر و ضایعات ساقه ذرت با گازی‌سازی بستر سیال (Qin *et al.*, 2015)، گازی‌سازی ترکیبی از خاک اره چوب کاج و ساقه پنبه با استفاده از گازی‌سازی دو مرحله ای (Wang *et al.*, 2015)، گازی‌سازی ساقه ذرت با استفاده از گازی‌سازی بستر ثابت فروکشند (Gai *et al.*, 2014)، گازی‌سازی ترکیبی از جلبک دریایی قهوه‌ای، شاخه درخت سیب و سدار ژاپنی با گازی‌سازی بستر ثابت (Kaewpanha *et al.*, 2014)، گازی‌سازی ترکیبی از میکرو جلبک و زیست‌توده چوبی پیش‌تیمار شده با گازی‌سازی بستر سیال حبابی (Yang *et al.*, 2013)، گازی-

1- Char

2-Downdraft fixed-bed gasification



سازی ترکیبی از پرس خاک اره چوب و پوست دانه‌های آفتابگردان با گازی‌ساز بستر ثابت فرو کشند (Simone *et al.*, 2012)، گازی‌سازی پوست درخت کاج و لجن فاضلاب به عنوان ضایعات زیست‌توده با استفاده از گازی‌ساز بستر ثابت فروکشند (Pérez *et al.*, 2012)، گازی‌سازی پسماند انگور حاصل از فرآوری انگور با گازی‌ساز جریان همزمان (Hernández *et al.*, 2012)، گازی‌سازی پسماند نارگیل با استفاده از گازی‌ساز جریان همزمان (Senapati and Behera, 2012)، گازی‌سازی برخی از بقایای کشاورزی از جمله ضایعات گل کلم، بلوط، گوجه فرنگی و پوسته فندق با استفاده از راکتور جریان پیوسته لوله‌ای (Madenoglu *et al.*, 2011)، گازی‌سازی ترکیبی زغال سنگ قهوه‌ای و زیست توده چوب (درخت اکالیپتوس) با استفاده از گازی‌ساز بستر ثابت (Xu *et al.*, 2011)، گازی‌سازی پلت‌های چوبی، کلش کلزا، کلش ذرت و ساقه آفتابگردان با استفاده از گازی‌ساز بستر ثابت (Plis and Wilk, 2011)، گازی‌سازی ترکیبی از زغال سنگ بتمنس و دو نوع از زیست توده، خاک اره کاج و کاه برنج با استفاده از گازی‌ساز بستر سیال (Li *et al.*, 2010)، گازی‌سازی تراشه‌های چوب افرا با استفاده از گازی‌ساز بستر ثابت دوگانه (Ammendola *et al.*, 2010)، گازی‌سازی ترکیبی از زغال سنگ بتمنس، کک نفتی و سه نوع از زیست توده، پوسته بادام، هسته زیتون و اکالیپتوس با استفاده از گازی‌ساز بستر ثابت لوله‌ای (Fermoso *et al.*, 2009)، گازی‌سازی بلال ذرت با استفاده از گازی‌ساز بستر سیال (Lu *et al.*, 2008)، گازی‌سازی ترکیبی از ضایعات کشاورزی (ساقه توتون، ساقه پنبه، ساقه آفتابگردان و چوب بلال ذرت) و ضایعات چرم با استفاده از گازی‌ساز بستر سیال (Yanik *et al.*, 2007) انجام شده است.

منابع کشاورزی ایران دارای توان بالقوه برای تولید یک منبع پایدار از زیست‌توده می‌باشد. باگاس یا بقایای نیشکر یکی از مهم‌ترین محصولات فرعی تولید شکر از نیشکر می‌باشد که پس از عصاره‌گیری نیشکر بصورت قطعات ریز تراشه نی (فیبر) مخلوط با بافت چوب پنبه‌ای مغزه نی (بنام پیت) بدست می‌آید. تولید متوسط نیشکر در هر هکتار حدود یکصد تن می‌باشد و بر اساس تجربیات به دست آمده در خوزستان پس از استحصال شربت از نیشکر حدود ۳۲ تن باگاس از هر هکتار به دست می‌آید. هم‌اینک حدود یک میلیون و ۸۰۰ هزار تن تفاله باگاس در سال در استان خوزستان تولید می‌شود که در صورت برنامه‌ریزی مناسب در زمینه بازیافت آن‌ها علاوه بر حفظ محیط زیست و ایجاد درآمد جانبی، از آن می‌توان به منظور رفع مقداری از انرژی مورد نیاز برای کارخانجات نیشکر بهره برد (بی‌نام، ۱۳۹۴).

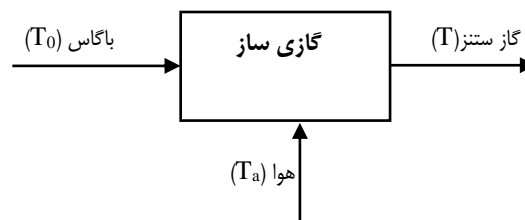
با توجه به پژوهش‌های گذشته هیچ‌گونه پژوهشی بر روی مدل‌سازی شیمیایی گازی‌سازی زیست توده در یک راکتور فروکشند و پتانسیل تولید گاز سنتز حاصل از آن با توجه به درصد رطوبت زیست توده و دمای راکتور به صورت جامع و کامل بر روی باگاس نیشکر ایران پرداخته نشده است. لذا در این تحقیق با توجه به اهمیت باگاس نیشکر به عنوان یک منبع انرژی زیست‌توده در دسترس در استان خوزستان، به مدل‌سازی، پتانسیل و بررسی عملکرد انرژی تولیدی حاصل از آن پرداخته خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

## مدل نظری

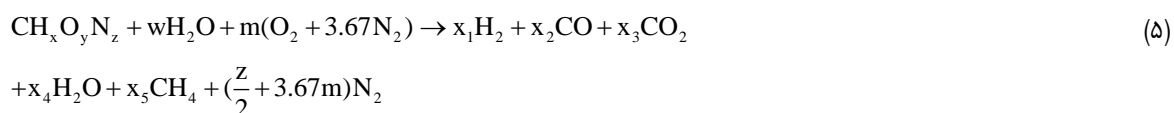
روند گازی‌سازی در این مقاله به صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. باگاس نیشکر در دمای محیط  $T_0$  وارد گازی ساز می‌شود. دمای عامل گازی ساز (هوا)  $T_a$  می‌باشد. گاز تولید شده در دمای راکتور  $T$ ، از گازی ساز خارج می‌شود. برای ساده کردن تجزیه و تحلیل، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

- ۱- زیست توده از عناصر کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن تشکیل شده است. گوگرد و سایر مواد معدنی نادیده گرفته می‌شود.
- ۲- تمام محتوای کربن در زیست توده به گاز در تبدیل می‌شود. زمان اقامت مواد در راکتور برای رسیدن به تعادل ترمودینامیکی به اندازه کافی زیاد می‌باشد.
- ۳- محصولات گاز سنتز از  $CO$ ،  $CO_2$ ،  $H_2$ ،  $CH_4$ ،  $N_2$  و آب تشکیل شده است که آن‌ها به عنوان گاز ایده آل در نظر گرفته می‌شوند. همچنین قطران در گاز سنتز در نظر گرفته نشده است.
- ۴- افت فشار در داخل گازی ساز در نظر گرفته نشده است.
- ۵- واکنش به صورت اتو ترمال انجام می‌شود و از هیچ گونه منبع خارجی برای حرارت دادن راکتور استفاده نمی‌شود. همچنین راکتور به طور کامل به صورت آدیاباتیک عمل می‌کند.



شکل ۲- شماتیکی از فرایند گازی‌سازی.

ترکیب شیمیایی زیست توده به شکل  $CH_xO_yN_z$  و واکنش گازی‌سازی به صورت معادله (۵) در نظر گرفته می‌شود:



که در آن  $w$  مقدار آب در هر کیلومول از باگاس،  $m$  مقدار هوا در هر کیلومول از باگاس،  $x_1$ ،  $x_2$ ،  $x_3$ ،  $x_4$  و  $x_5$  ضرایب ترکیبات محصولات می‌باشد.

عناصر موجود در زیست توده باگاس با انجام آنالیز دقیق در پژوهشکده انرژی و محیط زیست سازمان انرژی‌های نو ایران، در

جدول (۱)

ارایه شده است (سانا، ۱۳۹۱). فرمول شیمیایی باگاس بر اساس عناصر سازنده آن به معادله  $CH_{1.76}O_{0.74}N_{0.0069}$  بدست می‌آید.

جدول ۱- آنالیز دقیق باگاس نیشکر (سانا، ۱۳۹۱).

عناصر	درصد وزنی (wt%)
C	۴۴/۲۱
H	۶/۴۶
N	۰/۳۶
S	۱/۶
O	۴۳/۶۶
Ash	۳/۷۱

محتوای رطوبتی باگاس از رابطه (۶) بدست می‌آید:

$$MC = \frac{18w}{25.6 + 18w} \times 100 \quad (6)$$

که در آن MC محتوای رطوبتی (%) و w جرم آب موجود در باگاس نیشکر می‌باشد.

از واکنش فوق، شش مجهول  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  و m، به نمایندگی از پنج گونه ناشناخته از محصول و میزان اکسیژن برای واکنش وجود دارد. بنابراین، شش معادله مورد نیاز است، که از فرمول‌های زیر بدست خواهد آمد:

از تعادل کربن:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1 \quad (7)$$

از تعادل هیدروژن:

$$1.76 + 2w = 2x_1 + 2x_4 + 4x_5 \Rightarrow x_1 + x_4 + 2x_5 - w - 0.88 = 0 \quad (8)$$

از تعادل اکسیژن:

$$0.74 + w + 2m = x_2 + 2x_3 + x_4 \quad (9)$$

از ثابت تعادل دو واکنش تغییر آب-گاز و متان زایی برای بدست آوردن پارامترهای مجهول معادله عمومی (۵) استفاده می‌شود.

$$k_1 = \frac{P_{CH_4}}{(P_{H_2})^2} = \frac{x_5}{(x_1)^2} \quad (10)$$

$$k_1 = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}} = \frac{x_1 \cdot x_3}{x_2 \cdot x_4} \quad (11)$$

معادله تعادل آنتالپی برای فرایند گازی سازی راکتور بستر ثابت به صورت زیر می‌باشد:

$$H_{f,bagasse}^0 + w(H_{f,H_2O(l)}^0 + H_{(vap)}) + mH_{f,O_2}^0 + 3.76mH_{f,N_2}^0 = x_1H_{f,H_2}^0 + x_2H_{f,CO}^0 + x_3H_{f,CO_2}^0 + x_4H_{f,H_2O(g)}^0 + x_5H_{f,CH_4}^0 + \int_{T_1}^T (x_1c_{p,H_2} + x_2c_{p,CO} + x_3c_{p,CO_2} + x_4c_{p,H_2O} + x_5c_{p,CH_4} + 3.76mc_{p,N_2})dT \quad (12)$$

که در آن  $H_{f,bagasse}^0$  آنتالپی تشکیل باگاس،  $H_{f,H_2O(l)}^0$  آنتالپی تشکیل آب مایع،  $H_{(vap)}$  گرمای تشکیل بخار آب،  $H_{f,H_2}^0$ ،  $H_{f,CO}^0$ ،  $H_{f,CO_2}^0$ ،  $H_{f,H_2O}^0$ ،  $H_{f,N_2}^0$ ،  $H_{f,CH_4}^0$  به ترتیب آنتالپی تشکیل گازهای  $CH_4$  و  $O_2, N_2, H_2, CO, CO_2, H_2O$  می‌باشد. همچنین  $T_1$  و  $T_2$  به ترتیب دمای محیط و راکتور گازی ساز می‌باشد. ثابت  $K_1$  و  $K_2$  از معادله انرژی آزاد گیبس بدست می‌آید که از رابطه‌های زیر قابل استخراج است (Zainal *et al.*, 2001):

$$Lnk_1 = \frac{7082.848}{T} - 6.567 \times \ln T + \frac{7.466 \times 10^{-3} \times T}{2} - \frac{2.164 \times 10^{-6} \times T^2}{6} + \frac{0.701 \times 10^{-5}}{2 \times T^2} + 32.541 \quad (13)$$

$$Lnk_2 = \frac{5870.53}{T} + 1.86 \times \ln T - 2.7 \times 10^{-4} \times T - \frac{58200}{T^2} - 18.007 \quad (14)$$

که در آن  $T$  دمای راکتور می‌باشد.

گرمای لازم برای برای تشکیل ۱ مول از زیست توده باگاس ( $CH_{1.76}O_{0.74}$ ) از کربن جامد، هیدروژن و اکسیژن از معادله (۱۵) بدست می‌آید:



معادله تشکیل  $CH_{1.76}O_{0.74}$  بر اساس واکنش‌های زیر است:



آنتالپی تشکیل معادله (۱۸) از رابطه (۲۰) بدست می‌آید (Perry and Green, 1999):

$$DH_c = 2.326' (146.58 C + 568.78 H + 29.4 S - 6.58 Ash - 51.53 (O + N)) \quad \text{kJ/kg} \quad (20)$$

بنابراین آنتالپی تشکیل باگاس برابر با  $-۱۳۵۳۶۸/۷۴ \text{ kJ/kmol}$  بدست آمد.

همچنین ظرفیت گرمای ویژه از رابطه زیر بدست می‌آید (Perry and Green, 1999):

$$C_p = A' \frac{B}{2} T_0(t+1) + \frac{C}{3} T_0^2(t^2+t+1) + \frac{D}{t T_0^2} \quad (21)$$

که در آن  $t = \frac{T}{T_0}$  و  $A, B, C$  و  $D$  ثابت‌های معادله می‌باشد.

با حل معادلات غیر خطی ۱۱-۶ با استفاده از روش نیوتن-رافسون<sup>۱</sup> در نرم افزار متلب ضرایب معادلات بدست خواهد آمد.

### ارزیابی گازی ساز

### ترکیب گاز سنتز

ترکیب گاز سنتز در شرایط استاندارد از ۱۰۱/۳ کیلو پاسکال و ۲۷۳ K با استفاده از معادله (۲۲) محاسبه شد.

$$LHV = \sum_{n=1}^N LHV_n \cdot C_n \% \quad (22)$$

که  $LHV_n$  ارزش حرارتی پایینی هر گاز در ترکیب گاز سنتز ( $MJ/m^3$ ) و  $C_n$  درصد مولی هر گاز (mol) می‌باشد.

### بازده گاز سرد<sup>۲</sup>

بازده گاز سرد یکی از ابزارهای مفید برای ارزیابی عملکرد سیستم گازی ساز می‌باشد. آن به صورت درصد از ارزش حرارتی گاز سنتز به ارزش حرارتی سوخت بیان می‌شود. بازده گاز سرد با توجه به معادله (۲۳) بدست می‌آید (Siedlecki and de Jong, 2011).

$$\eta = \frac{LHV_{gas} \times V_{gas}}{LHV_f} \times 100 \quad (23)$$

که در آن  $LHV_{gas}$  ارزش حرارتی پایینی گاز ( $MJ/m^3$ )،  $V_{gas}$  محصول گاز سنتز ( $Nm^3/kg_{fuel}$ ) و  $LHV_f$  ارزش حرارتی پایینی سوخت ( $MJ/kg$ ) می‌باشد.

همچنین برای بدست آوردن ارزش حرارتی پایینی سوخت از رابطه (۲۴) استفاده می‌شود (Dahlquist, 2013).

$$LHV_f = HHV_f (1 - MC) - 2.447MC \quad (24)$$

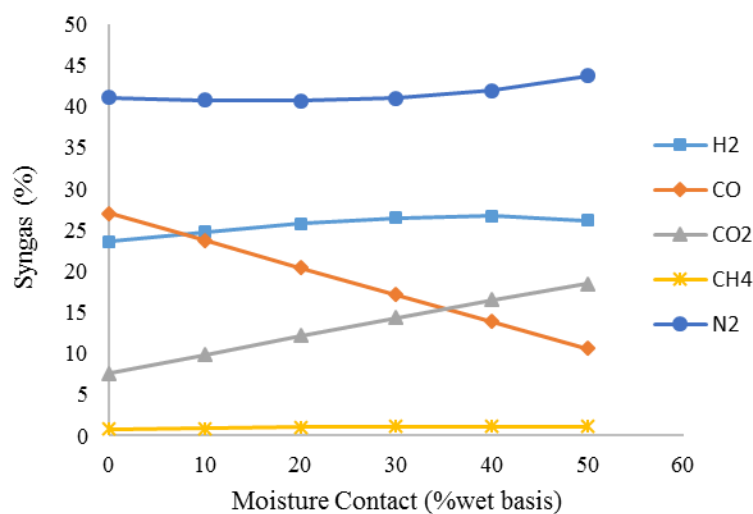
که در آن  $LHV_f$  ارزش حرارتی پایینی سوخت ( $kJ/kg$ )،  $HHV_f$  ارزش حرارتی بالایی سوخت که از رابطه (۲۰) بدست می‌آید ( $kJ/kg$ )، و  $MC$  محتوای رطوبتی باگاس می‌باشد.

### نتایج و بحث

1 - Newton-Raphson method  
2 - Cold Gas Efficiency



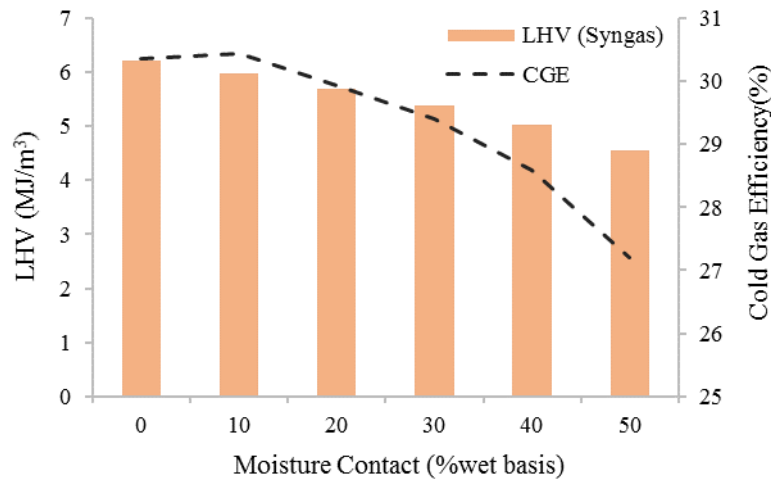
شکل (۳) اثر محتوای رطوبت بر درصد گازهای سنتز را نشان می‌دهد. همانطوریکه از نمودار مشخص است درصد گاز  $H_2$  با افزایش در محتوای رطوبت باگاس از ۰ تا ۴۰٪ به مقدار ۲۳/۵۷ تا ۲۶/۶۶ درصد افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر در رطوبت این مقدار کاهش می‌یابد. درصد گاز  $CO$  به طور یکنواخت با افزایش محتوای رطوبت باگاس کاهش می‌یابد. تغییر در درصد گاز  $CO$  نسبت به تغییر در درصد گاز  $H_2$  برجسته تر بود. درصد گاز  $CO$  با افزایش رطوبت از ۰ تا ۵۰٪ به مقدار ۲۶/۹۹ تا ۱۰/۶ درصد کاهش یافت. همانطوری که انتظار می‌رفت غلظت  $CO_2$  با افزایش محتوای رطوبت از ۷/۵۴ تا ۱۸/۴۲ درصد افزایش یافت. درصد گاز  $CH_4$  با افزایش محتوای رطوبتی به مقدار بسیار ناچیزی تغییر می‌کند (۰/۷۹-۱/۱۳٪). همچنین درصد گاز  $N_2$  نیز به مقدار کمی با افزایش محتوای رطوبتی افزایش یافت (۴۳/۱۷-۴۱/۱۱٪).



شکل ۳- اثر محتوای رطوبت بر درصد گازهای سنتز در دمای  $800^{\circ}C$ .

شکل (۴) ارزش حرارتی پایینی گاز سنتز و بازده گاز سرد در دمای  $800^{\circ}C$  گازی‌ساز و در محتوای رطوبتی مختلف باگاس را نشان می‌دهد. همانطوری که از شکل مشاهده می‌شود با افزایش محتوای رطوبتی سوخت  $LHV$  گاز سنتز کاهش می‌یابد. بیشترین و کمترین مقدار  $LHV$  به ترتیب در محتوای رطوبتی ۰ و ۵۰٪ به مقدار  $6/22$  و  $4/5$   $MJ/m^3$  بدست آمد که این مقدار با نتایج محققان دیگر که از باگاس نیشکر به عنوان خوراک اولیه گازی‌ساز استفاده کرده‌اند، مطابقت دارد (Erlich and Fransson, 2011; Plis and Wilk, 2011). افزایش محتوای رطوبتی به ۵۰٪ منجر به کاهش ارزش حرارتی گاز به  $1/72$   $MJ/m^3$  می‌شود. مهمترین عامل در کاهش ارزش حرارتی گاز سنتز، افزایش غلظت گاز  $CO_2$  به عنوان یک گاز بی‌اثر و کاهش غلظت گاز  $CO$  با افزایش محتوای رطوبت باگاس است. اگرچه با افزایش محتوای رطوبتی، غلظت گاز  $H_2$  و  $CH_4$  افزایش می‌یابد اما افزایش غلظت گاز  $CO_2$  و کاهش غلظت گاز  $CO$  بر روی ارزش حرارتی گاز عوامل غالب می‌باشند. همچنین با افزایش بیشتر رطوبت (بیشتر از ۴۰٪) به علت کاهش در غلظت  $H_2$ ، شدت کاهش ارزش حرارتی گاز بیشتر می‌شود. بیشترین مقدار بازده گاز سرد در محتوای رطوبتی ۱۰٪ مشاهده شد. به دلیل آنکه در این رطوبت مقدار حجم گاز سنتز تولیدی بیشینه است. همچنین با افزایش

رطوبت ارزش حرارتی سوخت باگاس کاهش می‌یابد. با افزایش رطوبت مقدار گازهای سنتز  $\text{CO}$ ،  $\text{H}_2$  و  $\text{CH}_4$  و به دنبال آن ارزش حرارتی گاز خروجی کاهش می‌یابد که درصد کاهش آن به مراتب بیشتر از کاهش ارزش حرارتی سوخت باگاس به دلیل افزایش محتوای رطوبتی می‌باشد. بنابراین با افزایش محتوای رطوبتی بیش از ۱۰٪ بازده گاز سرد روند نزولی دارد.

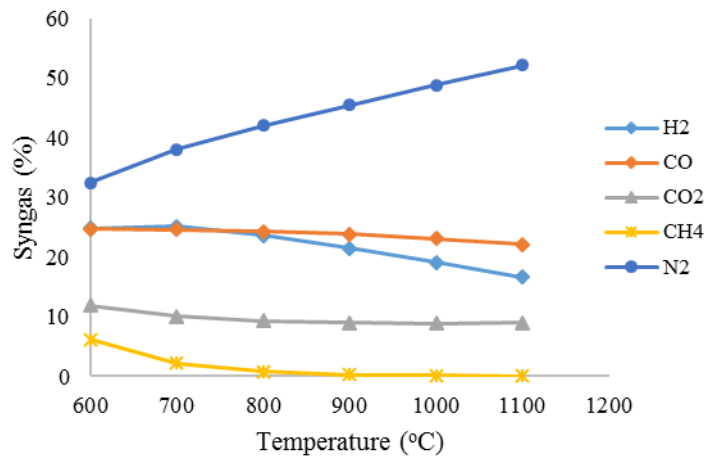


شکل ۴- اثر محتوای رطوبت بر ارزش حرارتی گاز سنتز و بازده گاز سرد در دمای ۸۰۰ °C.

اگرچه با کاهش رطوبت بازده و ارزش حرارتی سوخت افزایش می‌یابد اما استفاده زیست توده با رطوبت ۰٪ در عمل در راکتور گازی‌ساز غیر ممکن است کاهش رطوبت به ۰٪ نیاز به تبخیر رطوبت آب موجود از زیست توده می‌باشد که ممکن منجر به مصرف انرژی خارجی در فرایند خشک‌شدن در راکتور شود و بازده انرژی خالص کاهش یابد. همچنین کاهش رطوبت بیش از حد باعث استحکام بیشتر بافت‌های داخلی زیست‌توده نسبت به هم می‌شود و در ادامه فرایند گازی‌ساز تخریب زیست‌توده به گاز سنتز به سختی و با صرف انرژی بیشتر انجام خواهد گرفت. گزارش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از رطوبت ۲۰٪-۱۰٪ برای فرایند گازی‌ساز بستر ثابت فرو کشند مناسب می‌باشد (Roos, 2010). لذا در این تحقیق با توجه به درصد ترکیب گازها و تغییر ارزش حرارتی و بازده گاز سرد به کمتر از ۴٪، رطوبت ۱۰٪ جهت مدل سازی فرایند انتخاب شد.

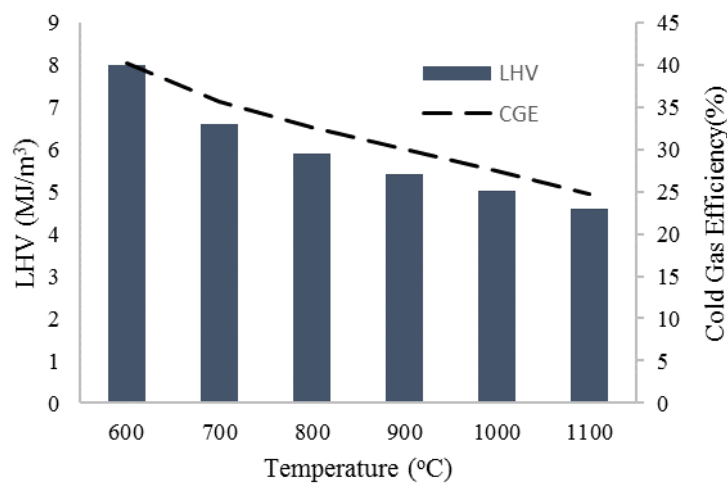
شکل (۵) تاثیر دمای فرایند گازی ساز بر روی ترکیب گازهای سنتز در رطوبت ۱۰٪ و در محدوده دمای ناحیه گازی سازی از ۶۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. پارامتر دما عامل تاثیر گذاری بر روی فرایند گازی‌ساز از نظر سینتیک واکنش و مقدار گازهای خروجی می‌باشد. ترکیب گاز سنتز به دست آمده نشان داد که غلظت هیدروژن ( $\text{H}_2$ ) به طور قابل توجهی با افزایش دما از ۷۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سلسیوس از ۲۵/۱۲٪ تا ۱۶/۶۴٪ کاهش می‌یابد. اما غلظت  $\text{H}_2$  در دمای ۶۰۰ کمتر از دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد (۲۴/۷۷٪). همچنین محتوای  $\text{CH}_4$  با افزایش دما روند نزولی دارد. این روند مطابق با اصل لوشاتلیه است که بیان می‌کند دماهای بالا برای واکنش دهنده‌ها در واکنش‌های شیمیایی گرماده و محصولات در واکنش‌های شیمیایی گرماگیر مطلوب است. بنابراین، واکنش گرماده رفرمینگ متان (معادله ۴) این نظریه را تایید می‌کند. محتوای  $\text{CO}$  عمدتاً توسط واکنش

گرماگیر تجزیه کربن منواکسید (معادله ۱) تعیین می‌شود. در نتیجه درجه حرارت بالا برای تولید CO مطلوب نیست و محتوای CO با درجه حرارت کاهش می‌یابد.



شکل ۵- اثر دمای گازی سازی بر درصد گازهای سنتز در محتوای رطوبت ۱۰ درصد.

بازده گاز سرد و ارزش حرارتی پایینی گاز سنتز در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود با افزایش دما LHV گاز سنتز کاهش می‌یابد. با افزایش دمای گازی سازی محتوای گاز سنتز CO، H<sub>2</sub> و CH<sub>4</sub> کاهش می‌یابد. محدوده LHV گاز سنتز بین ۴/۶-۶ MJ/Nm<sup>3</sup> از دمای ۶۰۰-۱۱۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین تغییرات بازده گاز سرد با دمای گازی سازی روند مشابهی با ارزش حرارتی پایینی گاز سنتز دارد. اگرچه به نظر می‌رسد که استفاده از دمای پایین باعث بهبود عملکرد گازی سازی از نظر ارزش حرارتی گاز خروجی و بازده گازی سازی شود اما باید توجه داشت که دمای پایین بیش از حد باعث تولید قطران و گرفتگی در راکتور گازی سازی خواهد شد (Mahinpey and Gomez, 2016).



شکل ۶- اثر دمای گازی سازی بر ارزش حرارتی گاز سنتز و بازده گاز سرد در محتوای رطوبت ۱۰ درصد.



## نتیجه‌گیری کلی

مدل تعادلی برای پیش‌بینی ترکیب گاز سنتز بر اساس رطوبت نهایی و تجزیه و تحلیل دقیق زیست توده یک دستاورد مهم می‌باشد که می‌تواند در فرایند گازی‌سازی باگاس نیشکر برای یافتن حد بالایی گاز سنتز در یک راکتور گازی‌ساز مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش اثر رطوبت باگاس و درجه حرارت راکتور از طریق مدل تعادلی به منظور یک ابزار مفید در طراحی گازی‌ساز بستر ثابت فرو کشند مورد مطالعه قرار گرفت. روش مورد استفاده در این مدل، استفاده از به حداقل رساندن انرژی آزاد گیبس بوده است. همچنین محاسبات از ترکیب، ارزش حرارتی و بازده گاز تولید شده با باگاس نیشکر به عنوان ماده خام اولیه بدست آمد. با تجزیه و تحلیل دقیق شناخته شده از زیست توده باگاس و ارزش حرارتی آن، مدل می‌تواند ترکیب و ارزش حرارتی گاز تولید شده را پیش‌بینی کند. نتایج نشان داد که محتوای  $H_2$  و  $CO_2$  در گاز تولید شده با افزایش محتوای رطوبتی افزایش می‌یابد. در حالی که محتوای  $CO$  و  $CH_4$  با افزایش محتوای رطوبتی روند کاهشی را در پی داشت. ارزش حرارتی گاز تولید شده با افزایش رطوبت باگاس کاهش یافت در حالی که بازده گاز سرد در رطوبت ۱۰٪ دارای بیشینه مقدار ۳۰/۳۵٪ بوده است. با افزایش دمای ناحیه احیاء در راکتور گازی‌ساز محتوای گازهای تولید شده کاهش یافت. اگرچه محتوای گاز هیدروژن در دمای  $700^\circ C$  بیشینه بوده است. همچنین ارزش حرارتی و بازده گاز سرد با افزایش دمای گازی‌ساز کاهش می‌یابد. در محدوده دمای مورد مطالعه و رطوبت ۱۰٪ ارزش حرارتی و بازده گاز سرد به ترتیب  $4-6 MJ/Nm^3$  و ۸-۲۴/۶۸٪ و  $40/1-24/68$  بدست آمد.

## منابع

بی‌نام. ۱۳۹۴. موسسه تحقیقات و آموزش توسعه نیشکر و صنایع جانبی خوزستان (accessed <http://www.iscrti.ir/>).

2.12.16).

سانا، سازمان انرژی‌های نو ایران. ۱۳۹۱. انجام آزمایش به منظور تعیین ارزش حرارتی سوخت‌های بومی کشور برای گازی‌سازی. پژوهشکده انرژی و محیط زیست.