

## تحلیل ترمودینامیکی و بررسی اثرات متقابل پارامترها در سیستم ریفرمینگ بخار آب بیوگاز-آب شیرین کن رطوبت زن-رطوبت زدا

هادی غائبی<sup>۱\*</sup>، الهه سلیمانی<sup>۲</sup>

\*۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی

ایمیل نویسنده مسئول: hghaebi@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۷

چکیده

در این مقاله، سیستم ریفرمینگ بخار آب بیوگاز تلفیق شده با سیستم آب شیرین کن رطوبت زن- رطوبت زدا پیشنهاد شده است که با تحلیل ترمودینامیکی به بررسی اثرات متقابل پارامترهای ورودی بر توابع هدف (بازده انرژی و بازده اگزرژی) با استفاده از روش طراحی آزمایش ها پرداخته شده است. مدل سازی ترمودینامیکی جامع با استفاده از نرم افزار ای ای اس<sup>۱</sup> انجام شده است. طبق نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیکی، بازده انرژی، بازده اگزرژی، نرخ جریان جرمی هیدروژن و نرخ جریان جرمی آب شیرین به ترتیب ۸۲/۳۹٪، ۷۲/۶۵٪، ۱۰۷۱/۰٪ و ۲۱۱/۰ کیلوگرم بر ثانیه بر ثانیه بدست آمده است. به این ترتیب، با استفاده از تحلیل ترمودینامیکی سیستم توسط نرم افزار ای ای اس و انتقال آزمایشات براساس طرح مرکب مرکزی<sup>۲</sup> برای پارامترهای استخراج شده (دمای ورودی رطوبت زدا)، نرخ جریان جرمی گردش یافته سیستم رطوبت زن- رطوبت زدا و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین کن) توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت<sup>۳</sup>، نتایج حاصله، تاثیر برهم کنش پارامترهای ورودی را نشان می دهد. در روش سطح پاسخ از طرح مرکب مرکزی در طراحی آزمایشی استفاده شده است. مقادیر R<sup>۲</sup> در پاسخ های بازده انرژی و بازده اگزرژی به ترتیب ۹۹/۹۹٪ و ۹۹/۹۷٪ محاسبه شده است که نشان دهنده دقت مدل است. نقاط بهینه برای پارامترهای ورودی A، B و C و همچنین پاسخ های بازده انرژی و بازده اگزرژی به ترتیب ۳۱۰ کلون، ۸ کیلوگرم بر ثانیه، ۴۵۰ کلون، ۹۰۵۱٪ و ۷۳۱۳٪ بدست آمده است.

کلمات کلیدی

ریفرمینگ بخار آب بیوگاز، سیستم آب شیرین کن رطوبت زن- رطوبت زدا، ترمودینامیک، روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی.

<sup>۱</sup>.Engineering Equation Solver  
<sup>۲</sup>. Central Composite Design  
<sup>۳</sup>.Design Expert

عمده‌ای است که جوامع بشری را با چالش‌هایی مواجه کرده است. این امر تأثیر زیادی بر رشد جمعیت و اقتصاد دارد. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵، نزدیک به ۷۰ درصد از جمعیت جهان از مشکلات کمبود آب شیرین رنج ببرند. یکی از راه‌های جبران این کمبود، بهبود فناوری‌های نمک‌زدایی در مقیاس صنعتی و خانگی است. آب‌شیرین‌کن HDH یکی از تکنیک‌های اصلی در فرآیندهای نمک‌زدایی از آب است. این روش به دلیل مزایایی مانند هزینه‌های عملیاتی کمتر در ظرفیت‌های پایین، کار در شرایط عملیاتی متوسط و عدم حساسیت به کیفیت آب شور ورودی در مقایسه با فرآیندهای نمک‌زدایی غشایی نسبت به سایر فرآیندهای نمک‌زدایی حرارتی مناسب‌تر است [۸]. محققان مختلف در این زمینه طرح‌های مختلفی از فرآیندهای HDH را برای بهبود عملکرد سیستم‌های HDH معمولی ارائه کردند، از جمله رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا هیبریدی-پمپ حرارتی (HDHHP) [۹]، فرآیندهای رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا در خلاء (VHDH) [۱۰]، فشرده‌سازی رطوبت (HC) [۱۱] و فن‌آوری‌های تزریق-استخراج [۱۲]. سیبیتی و همکاران [۱۳] یک سیستم ریفرمینگ بخار آب بیوگاز را در محدوده دما ۷۰۰-۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، هم از نظر تئوری و هم تجربی طراحی کرده‌اند. براساس نتایج بدست‌آمده، افزایش درجه حرارت و نسبت مولی بخار به کربن می‌تواند نرخ تولید هیدروژن را بهبود بخشد. گرگری و همکاران [۱۴] یک سیستم هیبریدی جدید برای اهداف تولید توان و هیدروژن با استفاده از ترکیب راکتور هلیوم مدولار توربین گاز (GT-MHR) به عنوان یک سیستم بالادست برای تولید توان و ریفرمینگ بخار آب بیوگاز به عنوان چرخه پایین‌دست برای تولید هیدروژن پیشنهاد کرد. یک تحلیل ترمودینامیکی جامع، و همچنین مطالعه پارامتریک، برای بررسی امکان‌سنجی سیستم پیشنهادی انجام شده است. براساس نتایج بدست‌آمده، ظرفیت تولید توان و ظرفیت تولید هیدروژن نیروگاه هیبریدی GT-MHR/BSR آن‌ها به ترتیب ۲۶۰/۱۳ مگاوات و ۲۱۷/۰ کیلوگرم بر ثانیه محاسبه شده است. عباسی و پوررحمانی [۱۵] یک سیستم یکپارچه زمین‌گرمایی نوین با دو پیکربندی مختلف برای تولید آب شیرین و هیدروژن پیشنهاد کردند. نتایج حاصل از تخریب آگزرژی و نرخ هزینه تخریب آگزرژی برای هر دو پیکربندی نشان داد که ژنراتور ترموالکتریک بالاترین مقادیر را در میان سایر اجزا دارد. سیگل کالینا و واحد آب

هیدروژن یک سوخت بسیار پرکاربرد است که می‌تواند از مواد مختلف و به روش‌های گوناگونی تولید شود. تولید هیدروژن در مقیاس صنعتی بیش از یک قرن است که در صنعت نفت و گاز عملیاتی شده است و پایه و اساس صنایع شیمیایی مدرن را تشکیل می‌دهد. در تاسیسات متمرکز و تولید پراکنده، هیدروژن باید از فرآیندهای تولید انبوه هیدروژن در مجاورت کاربردهای پیل‌سوختی ثابت عرضه شود. سه روش ثابت برای ریفرمینگ سوخت‌ها وجود دارد: ریفرمینگ بخار آب، اکسیداسیون جزئی و ریفرمینگ خودکار-حرارتی [۱]. تمام روش‌های ذکرشده یک مخلوط گاز سنتز تولید می‌کنند. با این حال، تفاوت در دمای واکنش و عوامل اکسیدکننده باعث ایجاد غلظت‌های مختلف مونواکسیدکربن در مخلوط گاز سنتز می‌شود. بیوگاز به عنوان کاربردی‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی استفاده می‌شود و تولید هیدروژن که نقش اصلی را در به حداقل رساندن گرمایش جهانی دارد. بیوگاز می‌تواند از تخمیر و تجزیه بی‌هوازی بیوماس از مواد مختلف آلی حاصل شود، که دارای ۶۰ تا ۷۰ درصد حجمی متان و ۳۰ تا ۴۰ درصد حجمی دی‌اکسیدکربن و مقادیر ناچیز از گازهای دیگر مانند هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن، مونواکسیدکربن و سولفید هیدروژن می‌باشد. به دلیل وجود درصد زیاد گازهای دی-اکسیدکربن و متان (گازهای گلخانه‌ای) در بیوگاز، می‌توان آن را به‌طور مؤثر توسط انواع فرآیندهای ریفرمینگ، تبدیل به هیدروژن کرد [۲]. بسیاری از کشورها برنامه‌های خود را برای بهره‌برداری در مقیاس بزرگ از بیوگاز آغاز کرده‌اند. منابع این امر مستلزم تحقیقات و تلاش‌های بسیاری از محققان برای مدل‌سازی فرآیندهای بازیابی از اتلافات شهری و صنعتی برای تولید برق یا سایر اشکال کالاهای است [۳]. در سال‌های اخیر هیدروژن به عنوان انرژی پاک برای تولید انرژی مورد توجه قرار گرفته است که سازگار با محیط‌زیست بوده و به‌طور گسترده در صنایع شیمیایی و نیروگاهی استفاده می‌شود [۴، ۵]. علاوه بر این، هیدروژن را می‌توان به‌طور مؤثر با اثرات گلخانه‌ای ناچیز توسط سیستم‌های پیل‌سوختی به برق تبدیل کرد و بالعکس [۶]. [۷]. در میان فرآیندهای مختلف، ریفرم بخار متان رایج-ترین فرآیند شیمیایی در تبدیل متان به هیدروژن با نسبت آب به متان ۱:۱ است. کمبود آب شیرین یکی از مشکلات

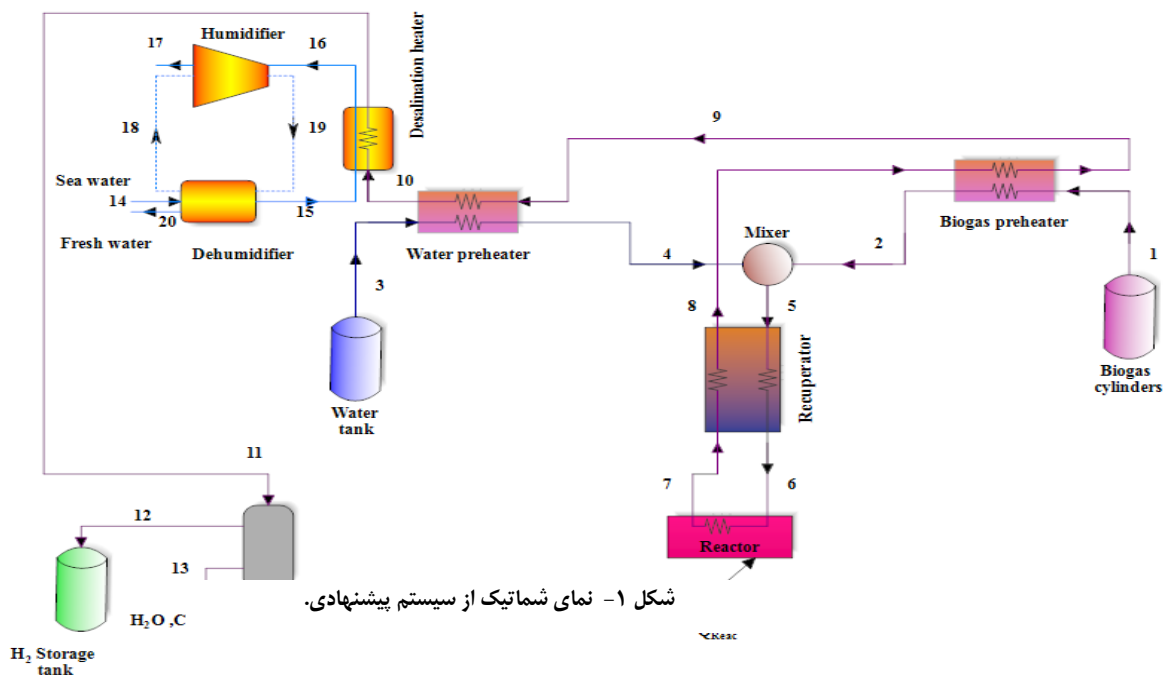
پارامترهای طراحی مختلف بر تبدیل متان در یک میکروکانال کاتالیزوری برای تولید هیدروژن انجام داده‌اند. RSM برای مطالعه اثرات ارتفاع کانال، سرعت و دمای ورودی، ضخامت و هدایت دیواره، و شار حرارتی خارجی بر تبدیل متان استفاده می‌شود. مشخص شده است که در بین پارامترهای مختلف، دمای گاز ورودی، بیشترین تأثیر را بر عملکرد کلی تولید هیدروژن میکروکانال دارد. همچنین، در صورت تغییر پارامتر تبدیل متان از ۵۰ درصد به ۶۰ درصد و ۶۰ درصد به ۷۰ درصد، حداکثر گرمای لازم واکنش ریفرمینگ به میزان ۸۴ درصد و ۲۶ درصد افزایش می‌یابد. ریحیمی اهر و حاتمی پور [۲۰] بهره‌وری آب شیرین یک سیستم سه مرحله‌ای رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی خلاء (VHDH) را با یک سیستم VHDH تک‌مرحله‌ای با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) مقایسه کرده است. مقادیر بهینه برای نسبت دبی جرمی آب شور به هوا (sw/a) و فشار رطوبت‌زنی (PH)  $1/77$  و  $33$  کیلوپاسکال منجر به حداکثر بهره‌وری آب شیرین شده است. در تمامی شرایط عملیاتی، با تبدیل رطوبت یک‌مرحله‌ای به فرآیندهای رطوبت‌زنی دو مرحله‌ای و سه مرحله‌ای، نسبت رطوبت به ترتیب حدود ۵۱ درصد و ۱۹ درصد افزایش یافته است. در این مطالعه، تجزیه و تحلیل جامع انرژی و انرژی یک سیستم ریفرمینگ بخار آب بیوگاز همراه با سیستم آب شیرین کن HDH برای تولید همزمان هیدروژن و آب شیرین انجام شده است. اگرچه چندین مطالعه با استفاده از روش سطح پاسخ در مسائل مهندسی مختلف گزارش شده است، استفاده از RSM در ارزیابی عملکرد سیستم تولید همزمان کمیاب است، که دامنه دیگری را برای این مطالعه ارائه می‌دهد. مدل‌های رگرسیونی با استفاده از RSM برای تخمین پارامترهای خروجی ارائه شده و تأثیر پارامترهای در نظر گرفته شده و اثر متقابل آن‌ها بر پارامترهای خروجی بررسی می‌شود. انگیزه و هدف پژوهش حاضر عبارتند از: ارائه مدل‌سازی ترمودینامیکی جامع سیستم پیشنهادی بر اساس قوانین اول و دوم ترمودینامیک. بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر یکدیگر و بر پارامترهای خروجی از طریق روش سطح پاسخ. بهینه‌سازی سیستم پیشنهادی با در نظر گرفتن بازده انرژی و انرژی به عنوان توابع هدف با استفاده از RSM.

۲- توصیف سیستم مورد مطالعه

شیرین کن HDH کمترین مقدار تخریب انرژی را در سیکل فعلی دارند. همچنین، مطالعات بهینه‌سازی نشان داد که در حالت بهینه بازده انرژی، هزینه آب شیرین و هزینه هیدروژن به ترتیب با مقادیر  $22/49\%$ ،  $2/94\$/m^3$  و  $7.37\$/kg$  بدست آمده است. غائبی و احمدی [۱۶] یک سیستم هیبریدی نوین همراه با واحدهای نمک زدایی بویلرهای بازیافت حرارت (HRSG) و آب شیرین کن HDH را معرفی کردند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم تولید سه‌گانه معرفی شده به ترتیب بار گرمایش، برق خالص و آب مقطر به مقادیر  $370/2$  کیلووات،  $1605$  کیلووات و  $345/708$  کیلوگرم بر ساعت تولید می‌کند. بر اساس این نتایج، بازده انرژی سه‌گانه و بازده انرژی به ترتیب  $85/06\%$  و  $63/04\%$  محاسبه می‌شوند. علاوه بر این، در بین تمام عناصر، پیل سوختی اکسید جامد و پس-سوز به ترتیب با مقادیر  $233/3$  کیلووات و  $173/3$  کیلووات به عنوان مخرب‌ترین اجزا شناخته می‌شوند. یک ارزیابی مطالعه پارامتریک جامع انجام شده و مشخص می‌شود که عوامل اصلی سیستم می‌توانند حداکثر مقادیر را از نظر ضریب مصرف سوخت، نسبت جریان نمک‌زدایی و حداکثر دمای نمک‌زدایی داشته باشند. طراحی آزمایشی کامل، هزینه و زمان موثری ندارد. روش طراحی آزمایشات (DOE) یک رویکرد مفید برای به حداقل رساندن زمان، هزینه و تعداد آزمایشات است. روش‌های DOE برای بهینه‌سازی متغیرهای پاسخ در حضور عوامل مختلف با سطوح مختلف استفاده می‌شوند. DOE استفاده از اصول هندسی در نمونه‌گیری آماری به دست آوردن نتایج مطلوب است. دستیابی به پاسخ مطلوب با کمترین تعداد آزمایش، مهم‌ترین هدف در DOE است [۱۰، ۱۱]. DOE امکان مطالعه همزمان چندین عامل و ارزیابی اهمیت آماری آن‌ها و همچنین ارزیابی اثرات متقابل را فراهم می‌کند. روش سطح پاسخ (RSM) یک ابزار قدرتمند برای طراحی تجربی، تحلیل، مدل‌سازی و بهینه‌سازی هر سیستم چند متغیره است و همچنین یکی از کاربردی‌ترین روش‌های DOE است [۱۷]. یکی از با ارزش‌ترین خروجی‌های RSM ارائه یک مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی متغیر پاسخ بر اساس پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده است. عملکرد بهینه‌سازی چندهدفه یکی دیگر از ابزارهای مهم RSM است که در بسیاری از برنامه‌های مهندسی استفاده می‌شود [۱۸]. به عنوان مثال، مصطفی پورعلی و همکاران [۱۹] یک تحقیق جامع برای مطالعه اثرات

ریفرمینگ استفاده می‌شود (جریان ۱۳). سپس هیدروژن جدا شده در مخزن ذخیره هیدروژن برای استفاده بیشتر در فرآیندهای مختلف صنعتی ذخیره می‌شود (جریان ۱۲). در زیر سیستم HDH، آب شور از طریق یک حلقه باز جریان دارد، در حالی که هوا در یک حلقه بسته جریان دارد. همچنین آب دریا وارد رطوبت‌زدا می‌شود (جریان ۱۴) و سپس از رطوبت‌زدا خارج می‌شود (جریان ۱۵)، در حالی که آب شور در هیتر نم‌زدایی گرم می‌شود و وارد رطوبت‌زن می‌شود تا از طریق آن اسپری شود (جریان ۱۶). آب شور به جریان هوا تبخیر می‌شود و مابقی به عنوان آب نمک از دستگاه رطوبت‌زن خارج می‌شود

در شکل ۱، نمای شماتیک از سیستم پیشنهادی نشان داده شده است. پیکربندی پیشنهادی ترکیبی از یک سیستم ریفرمینگ بخار آب بیوگاز (BSR) برای تولید هیدروژن و یک زیرسیستم HDH برای تولید آب شیرین است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مخلوط بیوگاز (جریان ۱) از یک طرف به سیستم وارد و از طرف دیگر بخار آب (جریان ۳) وارد فرآیند می‌شوند. جریان‌های پیش‌گرم‌شده (جریان ۲ و ۴) در مخلوط‌کننده با هم مخلوط (جریان ۵) و در ریکراتور با استفاده از دمای بالای محصولات



(جریان ۱۷)، در حالی که هوا از طریق مرطوب‌زن به گردش درمی‌آید و مرطوب می‌شود. در نهایت، هوا از دستگاه رطوبت‌ساز خارج می‌شود و سپس به سمت دستگاه رطوبت‌زدا جریان می‌یابد (جریان ۱۸)، جایی که آب شیرین تولید می‌شود (جریان ۲۰)، در حالی که هوای سرد به رطوبت‌زن باز می‌گردد و چرخه را تکرار می‌کند (جریان ۱۹).

واکنش ریفرمینگ دوباره گرم شدند (جریان ۷) تا شرایط لازم برای انجام واکنش شیمیایی ریفرمینگ در ریفرمر (جریان ۶) آماده شود. جریان گازهای خروجی واکنش در ریفرمر که شامل ترکیب‌های شیمیایی هیدروژن، کربن-مونواکسید، دی‌اکسیدکربن، متان و بخار آب بوده، دارای انرژی حرارتی قابل توجهی است. برای استفاده بهینه از گرمای بالای این جریان (جریان ۷)، مخلوط بیوگاز و بخار آب ورودی سیستم، پیش‌گرم می‌شوند. پس از فرآیندهای پیش‌گرم‌کردن، دمای خروجی گاز خروجی (جریان ۱۰) که مقدار هیدروژن بالاتری نسبت به سایر اجزا دارد، با دفع انرژی حرارتی به محیط در رادیاتور، کاهش می‌یابد (جریان ۱۰-۱۱). در نهایت، از یک واحد تصفیه برای جداسازی هیدروژن از محصولات گازی

۳- مدل‌سازی ترمودینامیکی

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (5)$$

$$\sum_i \dot{E}_{in} = \sum_i \dot{E}_{out} \quad (6)$$

که  $\dot{E}_{in}$  مقدار انرژی ورودی و  $\dot{E}_{out}$  مقدار انرژی خروجی به حجم کنترل است.

• سیستم تولید هیدروژن

برای تعیین میزان تولید هیدروژن به ازای هر مول متان از روابط (۷-۹) استفاده شده است [۲۲]:

نسبت مولی بخارآب به کربن در ابتدای واکنش:

$$S_c = \left[ \frac{n_{H_2O}}{n_{CH_4}} \right]_{in} \quad (7)$$

نسبت مولی دی اکسیدکربن به متان در مخلوط بیوگاز:

$$C_m = \left[ \frac{n_{CO_2}}{n_{CH_4}} \right]_{in} \quad (8)$$

میزان تولید هیدروژن به ازای هر مول متان:

$$y_{H_2} = \frac{(n_{H_2})_{out}}{(n_{CH_4})_{in}} \quad (9)$$

که  $(n_{H_2})_{out}$ ، مول هیدروژن خروجی از واکنش ریفرمینگ و  $(n_{CH_4})_{in}$ ، مول متان ورودی در مخلوط بیوگاز است.

به همین ترتیب بازده انرژی و بازده انرژی به صورت روابط زیر تعریف شده است:

$$\eta_{en,tot} = \frac{(\dot{m}_{H_2} \cdot LHV_{H_2}) + (\dot{m}_{fw} \cdot h_{fg}) + \dot{Q}_{react}}{(\dot{m}_{Biogas} \cdot LHV_{Biogas}) + \dot{Q}_{react}} \quad (10)$$

$$\eta_{ex,tot} = \frac{\dot{E}x[20] + \dot{E}x[13]}{(\dot{m}_1 \cdot e_{ch,biogas}^0) + \dot{Q}_{react} \left(1 - \frac{T_0}{T_{HS}}\right)} \quad (11)$$

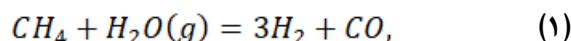
۴- روش طراحی آزمایش‌ها<sup>۱</sup>

طراحی آزمایشی عبارت است از مشاهده و تفسیر متغیرها بر روی خروجی فرآیند، با ایجاد تغییراتی در میان عوامل مؤثر بر فرآیند، با هدف بهبود عملکرد یک فرآیند. روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرآیندها ارزشمند است. در واقع، RSM مجموعه‌ای از تکنیک‌های

در این پژوهش، ابتدا واکنش‌های انجام‌شده در سیستم ریفرمینگ بخارآب بیوگاز مدل‌سازی شده، سپس مدل-سازی ترمودینامیکی، معادلات موازنه جرم و انرژی سیستم موردنظر ارائه شده است. از نرم‌افزار ای‌ای‌اس به عنوان ابزار اصلی در محاسبات استفاده می‌شود.

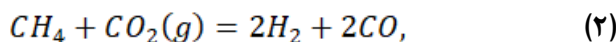
• مدل‌سازی واکنش‌های شیمیایی انجام‌شده ریفرمینگ به طور کلی، فرآیند ریفرمینگ بخارآب بیوگاز که در ریفرمینگ انجام می‌شود، می‌تواند ترکیب کلی واکنش‌های تعادلی (۱-۴) باشد [۲].

واکنش ریفرمینگ بخارآب و متان:



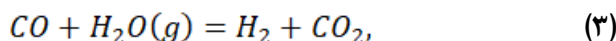
$$\Delta H_{298} = 206.1 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

واکنش ریفرمینگ دی‌اکسیدکربن و متان:



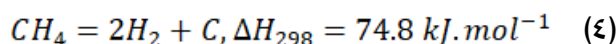
$$\Delta H_{298} = 247.3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

واکنش شیفت گاز آب:



$$\Delta H_{298} = -41.2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

واکنش تجزیه متان:



هر دو واکنش ۱ و ۲ به شدت گرماگیر است و در فشارهای پایین و دماهای بالا (۸۰۰-۱۲۰۰ کلوین) صورت می‌گیرند. به همین دلیل، منبع گرمای مناسبی برای انجام واکنش لازم است. واکنش شیفت گازآب هم گرماده است و در دماهای پایین (۵۰۰-۶۰۰ کلوین) انجام می‌گیرد. محدودیت اصلی واکنش ۲، امکان تشکیل کربن (در واکنش تجزیه متان) و نیاز به منبع دمای بالایی برای انجام واکنش است. انجام همزمان واکنش ۱ و ۲ که در آن می‌توان با اضافه کردن بخارآب به متان در دماهای بالا، میزان تولید هیدروژن و بازده انرژی سیستم را افزایش و همچنین امکان تشکیل کربن را کاهش داد [۲۱].

• موازنه جرم و انرژی

با فرض شرایط پایا برای هر حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۱، موازنه جرم و انرژی برای هر یک از اجزای سیستم به ترتیب به صورت روابط ۵ و ۶ خواهد بود [۲۰]:

<sup>۱</sup>. Design of experiments

مطالعات قبلی داشسته است.

- فرضیات و اطلاعات ورودی سیستم در ادامه، فرضیات و معادلات حاکمی که برای تحلیل سیستم آورده شده است، عبارتند از:
  - کلیه مدل سازی ها در شرایط پایا انجام شده است.
  - فقط آگرژی های فیزیکی و شیمیایی در ارزیابی آگرژی در نظر گرفته شده و تغییرات انرژی های جنبشی و پتانسیل نادیده گرفته شده است.
  - از افت فشار و تلفات حرارتی در تمامی اجزای سیستم صرف نظر شده است. دمای آب شیرین تولیدی به عنوان میانگین دمای هوا در حالت های ۱۸ و ۱۹ در نظر گرفته می شود [۲۶-۲۸]. رطوبت نسبی هوای ورودی و خروجی از رطوبت زن ۹۰٪ در نظر گرفته شده است [۲۶]. علاوه بر این، برخی از داده های ورودی مورد نیاز برای تحلیل سیستم مورد نظر در جدول ۱ آمده است. همچنین، در این مقاله با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت مجموعه ای از آزمایش ها به شرح جدول ۲ طراحی شده است. همچنین همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، آزمایش ها در سه سطح مختلف (دمای ورودی رطوبت زدا (T<sub>۱۴</sub>))، نرخ دبی جرمی گردش یافته در رطوبت زن-رطوبت زدا (m<sub>۱۹</sub>) و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین کن نمک زدایی (T<sub>۱۰</sub>) مورد بررسی قرار گرفتند

جدول ۱- داده های ورودی ترمودینامیکی مورد نیاز و پارامترهای ثابت

فرض شده در سیستم پیشنهادی

مقدار	توضیح	نماد
۲۹۸/۱۵	دمای مرجع [۲۹]	T <sub>0</sub> (K)
۱/۰۱۳	فشار مرجع [۲۹]	P <sub>0</sub> (bar)
۲۹۸/۱۵	دمای بیوگاز [۲۹]	T <sub>Biogas</sub> (K)
۶/۸۹۵	فشار بیوگاز [۲۹]	P <sub>Biogas</sub> (bar)
۲۹۸/۱۵	دمای خروجی تانک آب [۲۹]	T <sub>21</sub> (K)
۹۰	کارایی پیش گرمکن بیوگاز [۲۹]	ε <sub>BPH</sub> (%)
۹۰	کارایی ریکراتور [۲۹]	ε <sub>Rec</sub> (%)
۹۰	کارایی پیش گرمکن آب [۲۹]	ε <sub>WPH</sub> (%)
۰/۱۵	نسبت مولی کربن دی اکسید به متان	C <sub>m</sub>
۶	نسبت مولی بخار آب به کربن ریفرمر	S <sub>c</sub>
۱۵	اختلاف دمای ریفرمر	ΔT <sub>Ref</sub> (K)
۱۵	اختلاف دمای رادیاتور	ΔT <sub>Rad</sub> (K)
۲۹۸/۱۵	دمای حد بالای سیستم تولید آب شیرین	T <sub>14</sub> (K)
۳۴۸/۱۵	دمای حد پایین سیستم تولید آب شیرین	T <sub>16</sub> (K)
۵	اختلاف دمای انتهایی در گرمکن	TTD <sub>DH</sub> (K)
۲/۳۳۳	نرخ جریان جرمی سیستم تولید آب شیرین	m <sub>r</sub> (K)
۳۵	میزان شوری آب دریا	(g/kg)

آماری و ریاضیات عملی برای ایجاد مدل های تجربی [۲۳] و در جایی که متغیرهای ورودی مختلف بر خروجی های مختلف فرآیند تأثیر می گذارند سودمندتر است. متغیرهای ورودی را متغیرهای مستقل می گویند که قابل کنترل هستند و خروجی ها را پاسخ می نامند. یکی از جنبه های ارزشمند RSM ایجاد یک مدل تقریبی مناسب بین پاسخ و متغیرهای مستقل با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) است [۲۴]. رایج ترین مدل مورد استفاده برای ایجاد تابع، مدل چندجمله ای درجه دوم به نام مدل رگرسیون است که می تواند به صورت معادله ۱۲ بیان شود [۱۸]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (12)$$

برای تایید و دقت مدل از ANOVA استفاده شده است. انتخاب و رد شرایط مدل با سطح اطمینان ۹۵٪ بر روی مقدار احتمال (p-values) و سطح معنی داری ۵٪ تنظیم شده است. همچنین برای تعیین برازش مدل از ضریب تعیین (R<sup>۲</sup>) استفاده شده که پارامتر کلیدی در ارزیابی مدل است که درصد تغییرات را با ۱ به عنوان ۱۰۰٪ از تغییراتی که توسط مدل قابل توصیف است و ۰ به عنوان ناتوانی کل یک مدل در تقریب واکنش ریفرمینگ توصیف می کند. مقدار بالای R<sup>۲</sup> نزدیک به ۱ نشان می دهد که مدل برازش خوبی را در مدل چند جمله ای با داده های تجربی فراهم می کند. نمودارهای سطح پاسخ سه بعدی (۳D) برای تجسم اثر متقابل متغیرهای مستقل با پاسخ ترسیم شده است. این نمودارها با تغییر دو متغیر نمایش داده شدند، در حالی که سایر متغیرها در سطح صفر نگه داشته شدند. همچنین مقادیر آزمایشی پاسخ اندازه گیری و مقادیر پیش بینی شده به دست آمده از مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. ضرایب معادلات و آزمایش ANOVA محاسبه شده و نمودارهای سطح پاسخ مربوطه بر این اساس ترسیم شده است [۲۵].

#### ۵- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، نتایج به دست آمده از تحلیل های انرژی و آگرژی و همچنین تحلیل RSM برای سیستم پیشنهادی بر اساس شرایط طراحی، مفروضات و معادلات حاکم ارائه می شود، همچنین نتایج حاصل از اعتبارسنجی در مرجع [۲۱] اشاره شده است که نتایج، همخوانی خوبی با

بازده انرژی به ترتیب ۹۹/۹۸٪ و ۹۹/۹۴٪ است. نشان می‌دهد که این مقدار از تنوع در پاسخ‌ها را می‌توان با مدل در نظر گرفته شده توصیف کرد.

جدول ۵- داده‌های خروجی از آنالیز رگرسیون مدل ۲FI در طرح مرکب مرکزی.

پارامترها	بازده انرژی	بازده انرژی
P <sub>value</sub>	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱
R <sup>۲</sup>	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۹
R <sup>۲</sup> <sub>adj</sub>	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۹۸
Adequate Precision	۴۲۱/۳۱۲	۲۳۵/۲۱۵

• ارزیابی مدل‌ها

با استفاده از نمودارهای آماری اغتشاشی و نرمال مانده‌ها، اثر سه متغیر مستقل شامل دمای ورودی رطوبت‌زدا (T<sub>۱۴</sub>)، نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا (m<sub>۱۹</sub>) و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین کن (T<sub>۱۰</sub>) بررسی شده است. طبق شکل ۲، در نمودارهای اغتشاشی، اثر انحراف هر عامل از نقطه مرجع در فرآیند پاسخ زمانی نشان داده می‌شود که سایر عوامل ثابت فرض شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمودار بازده انرژی، پارامتر A یک ضریب کاهش، پارامتر B یک ضریب افزایشی و پارامتر C یک ضریب کاهش با شیب اندک است. همچنین تغییرات نمودار بازده انرژی مشابه نمودار قبلی است با این تفاوت که پارامتر C با شیب بیشتری در حال کاهش است.

در شکل ۳، نمودار احتمال نرمال نشان می‌دهد که مانده‌ها

پارامتر	نماد	مقدار
بار حرارتی راکتور (kW)	Q <sub>Reac</sub>	۳۳۱۷
بار ریکراتور (kW)	Q <sub>Rec</sub>	۱۷۹۷/۶
بار پیش گرمکن بیوگاز (kW)	Q <sub>BPH</sub>	۲۶۹/۸
بار پیش گرمکن آب (kW)	Q <sub>WPH</sub>	۹۲۴/۲
نرخ جریان جرمی هیدروژن (kg/s)	m <sub>Hydrogen</sub>	۰/۱۰۷۱
نرخ جریان جرمی آب شیرین (%)	m <sub>Fresh water</sub>	۰/۲۱۱
بازده انرژی سیستم ترکیبی (%)	η <sub>en</sub>	۸۲/۳۹
بازده انرژی سیستم ترکیبی (%)	η <sub>ex</sub>	۷۲/۶۵

چگونه از یک توزیع نرمال پیروی می‌کنند. حتی با وجود داده‌های طبیعی انتظار برخی پراکنش‌های متوسط وجود دارد. در هر دو پاسخ، مقادیر باقی مانده کوچکتر نشان-دهنده دقت مدل است.

• بررسی تاثیر متغیرها بر روی پاسخ‌ها

شکل ۴- الف، اثرات دمای ورودی رطوبت‌زدا (T<sub>۱۴</sub>)، نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا (m<sub>۱۹</sub>) بر

تعداد اجرای آزمایش	A: T <sub>۱۴</sub> (K)	B: m <sub>۱۹</sub> (kg/s)	C: T <sub>۱۰</sub> (K)
۱	۳۱۰	۵	۵۰۰
۲	۳۲۰	۵	۴۷۵
۳	۳۳۰	۸	۴۵۰
۴	۳۲۰	۸	۴۷۵
۵	۳۳۰	۵	۵۰۰
۶	۳۳۰	۶/۵	۴۷۵
۷	۳۳۰	۵	۴۵۰
۸	۳۲۰	۶/۵	۵۰۰
۹	۳۱۰	۵	۴۵۰
۱۰	۳۳۰	۸	۵۰۰
۱۱	۳۲۰	۶/۵	۴۷۵
۱۲	۳۱۰	۸	۴۵۰
۱۳	۳۱۰	۶/۵	۴۷۵
۱۴	۳۲۰	۶/۵	۴۵۰
۱۵	۳۱۰	۸	۵۰۰

جدول ۳- محدوده آزمایشی، سطوح و نام کد شده متغیرهای مستقل

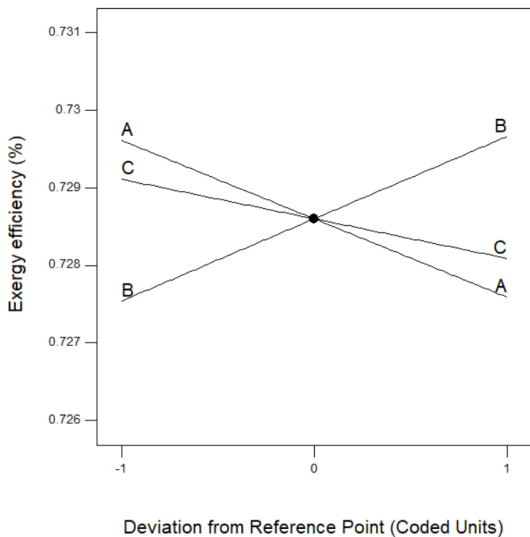
متغیرها	متغیرهای کد شده	سطح متغیرها
T <sub>۱۴</sub> (K)	A	-۱, ۰, +۱
m <sub>۱۹</sub> (kg/s)	B	۵, ۶/۵, ۸
T <sub>۱۰</sub> (K)	C	۴۵۰, ۴۷۵, ۵۰۰

• نتایج تحلیل ترمودینامیکی

نتایج اصلی سیستم در جدول ۴ ارائه شده است. با مراجعه به جدول ۴، بازده انرژی و بازده انرژی سیستم به ترتیب ۸۲٪/۳۹ و ۷۲٪/۶۵ به دست آمده است. علاوه بر این، در شرایط داده شده، دبی جرمی هیدروژن و دبی جرمی آب شیرین به ترتیب ۱۰۷۱/۰ کیلوگرم بر ثانیه و ۲۱۱/۰ کیلوگرم بر ثانیه محاسبه شده است.

• نتایج حاصل از رگرسیون

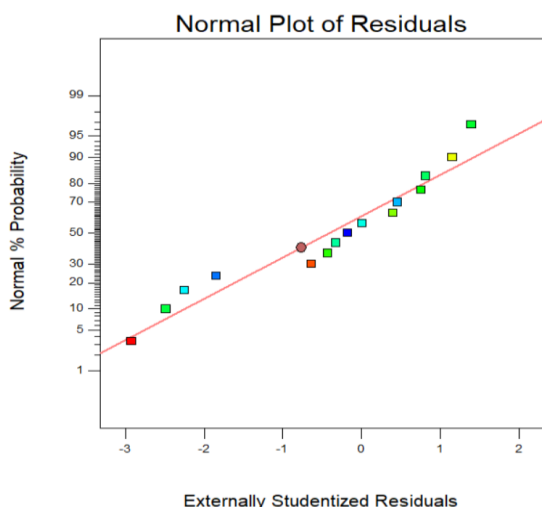
برای این سیستم از آنالیز واریانس (ANOVA)، مدل ۲FI برای تعیین دقت مدل‌ها و برازش سیستم استفاده شده است. دمای ورودی رطوبت‌زدا (T<sub>۱۴</sub>)، نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا (m<sub>۱۹</sub>) و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین کن (T<sub>۱۰</sub>) به عنوان متغیرهای ورودی و بازده انرژی و بازده انرژی به عنوان پاسخ در نظر گرفته شده‌اند. بر اساس نتایج ANOVA، مدل‌های رگرسیون برای پاسخ‌های بازده انرژی و بازده انرژی به ترتیب به صورت معادله‌های (۱۰) و (۱۱) بدست آمده است. مقدار P<sub>value</sub> کمتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد که مدل در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقادیر R<sup>۲</sup> در پاسخ‌های بازده انرژی و انرژی به ترتیب ۹۹/۹۹٪ و ۹۹/۹۷٪ به دست آمده است. مقادیر R<sup>۲</sup><sub>adj</sub> برای مدل رگرسیون بازده انرژی و



(ب)

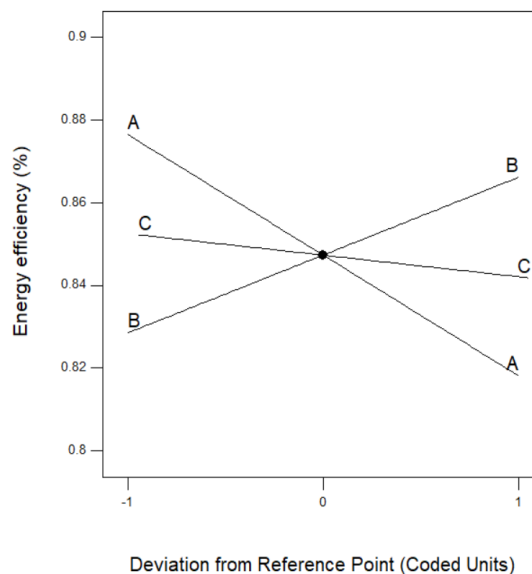
شکل ۲- تاثیر دمای ورودی رطوبت‌زدا ( $T_{14}$ )، نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ ) و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین‌کن ( $T_{10}$ ) بر الف) بازده انرژی ب) بازده انرژی

شکل ۴- ب، با افزایش دمای ورودی  $T_{10}$ ، بازده انرژی اندکی افزایش می‌یابد و علت افزایش آن، افزایش دبی جرمی ورودی رطوبت‌زدا است که بر دبی آب شیرین‌کن تاثیر می‌گذارد. شکل ۴- ج اثرات نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ ) و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین‌کن ( $T_{10}$ ) را بر بازده انرژی نشان می‌دهد. همان‌طور که تأثیر هر پارامتر بر پاسخ بازده انرژی بررسی شد، از شیب هر متغیر در محدوده بالا و پایین مشاهده می‌شود که این دو پارامتر برهم‌کنش کمی با یکدیگر دارند.



بازده انرژی نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با افزایش  $T_{14}$ ، در هر دو دبی جرمی بالا و پایین ( $m_{19}$ )، بازده انرژی کاهش می‌یابد، اما این کاهش در دبی جرمی بالاتر شیب نسبتاً بیشتری دارد و این به دلیل برهم‌کنش متغیرها (دمای ورودی رطوبت‌زدا ( $T_{14}$ ))، نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ ) است. از آنجایی که با افزایش  $T_{14}$  دبی آب شیرین‌کن کاهش می‌یابد و طبق رابطه ۱۰ بازده انرژی که این پارامتر رابطه مستقیمی با دبی آب شیرین‌کن دارد که باعث کاهش بازده انرژی می‌شود. همچنین با افزایش نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ )، در هر دو محدوده دمای  $T_{14}$  پایین و بالا، بازده انرژی افزایش می‌یابد و این به دلیل افزایش دمای جریان ۱۹ و دبی آب شیرین‌کن است.

شکل ۴- ب اثرات دمای ورودی رطوبت‌زدا ( $T_{14}$ ) و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین‌کن ( $T_{10}$ ) را بر بازده انرژی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش هر دو دما (دمای ورودی رطوبت‌زدا ( $T_{14}$ ) و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین‌کن ( $T_{10}$ ))، بازده انرژی افزایش می‌یابد و با توجه به



(الف)

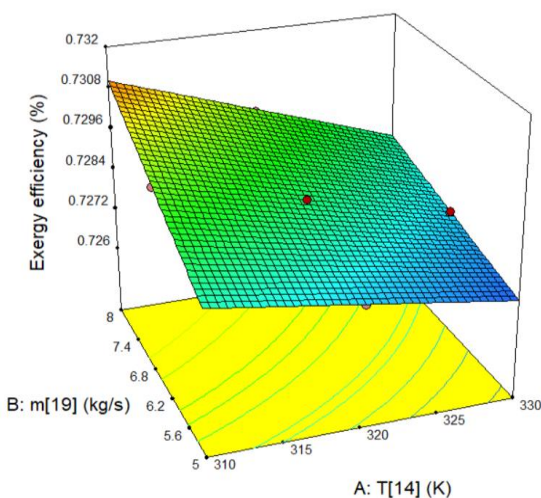


بازده انرژی کاهش می‌یابد و این به دلیل کاهش نرخ جریان جرمی جریان ۲۰ و آگزرژی مربوطه است. شکل ۵- ب اثرات دمای ورودی رطوبت‌زدا ( $T_{14}$ ) و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین‌کن ( $T_{10}$ ) را بر بازده آگزرژی نشان می‌دهد و این افزایش در دماهای پایین شیب بیشتری نسبت به دماهای بالاتر دارد و این تفاوت در شیب نشان‌دهنده برهم‌کنش این دو متغیر است. عامل افزایش دمای ورودی رطوبت‌زدا اشاره شد و افزایش دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین‌کن به دلیل افزایش دبی جرمی جریان ۲۰ و آگزرژی مربوطه است که رابطه مستقیمی با بازده آگزرژی دارد.

شکل ۵- ج اثرات نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ ) و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین‌کن ( $T_{10}$ ) را بر بازده آگزرژی نشان می‌دهد. با توجه به دلایلی که قبلاً ذکر شد، تغییرات این متغیرها بررسی شده و تفاوت نسبی شیب‌ها نشان‌دهنده اثر متقابل متغیرهای مذکور است.

#### • نتایج بهینه‌سازی

در قسمت بهینه‌سازی مطابق شکل ۶، نقاط بهینه پیشنهادشده توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پارامترهای A، B و C به ترتیب در نقاط ۳۱۰ کلون، ۸ کیلوگرم بر ثانیه و ۴۵۰ کلون و همچنین پاسخ‌های بازده انرژی و بازده آگزرژی در نقاط ۰/۹۰۵۱ درصد و ۰/۷۳۱۷ درصد به عنوان نقاط بهینه پیشنهاد شده‌اند.

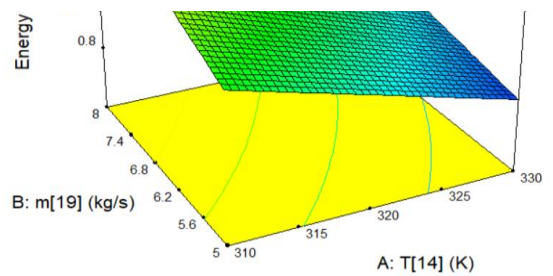


(الف)

#### (الف)

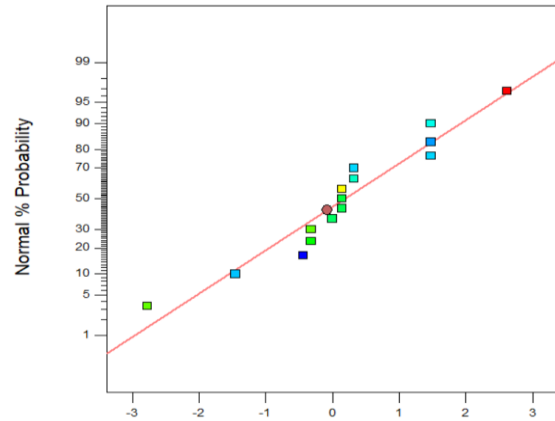
شکل ۳- نمودار احتمال نرمال برای پاسخ‌های الف) بازده انرژی و ب)

شکل ۴- نمودار سه‌بعدی روش سطح پاسخ برهم‌کنش پارامترهای الف) دمای ورودی رطوبت‌زدا ( $T_{14}$ )، نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ )، ب) اثرات دمای ورودی رطوبت‌زدا ( $T_{14}$ ) و دمای ورودی هیتر نمک‌زدایی ( $T_{10}$ ) و ج) نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ ) و دمای ورودی هیتر نمک‌زدایی ( $T_{10}$ )، بر پاسخ بازده انرژی



ه) آگزرژی.

#### Normal Plot of Residuals



Externally Studentized Residuals

شکل ۵، تأثیر متغیرهایی از جمله دمای ورودی رطوبت‌زدا ( $T_{14}$ )، نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ ) و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین‌کن ( $T_{10}$ ) را بر بازده آگزرژی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵- الف، با افزایش  $T_{14}$ ، در دبی جرمی بالا و پایین ( $m_{19}$ )، بازده آگزرژی با شیب ملایم افزایش می‌یابد و این افزایش در دبی جرمی بالاتر ( $m_{19}$ ) نسبتاً تندتر است و این برهم‌کنش متغیرها (جمله دمای ورودی رطوبت‌زدا ( $T_{14}$ ))، نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ )) را نشان می‌دهد. عاملی که بازده آگزرژی را با افزایش دما افزایش می‌دهد، افزایش دما و آنتالپی متناظر با آن نقطه است که طبق رابطه ۱۱ با بازده آگزرژی رابطه مستقیم دارد. بنابراین، با افزایش نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا، در هر دو محدوده  $T_{14}$  بالا و پایین،

شکل ۶- نتایج حاصل از بهینه‌سازی

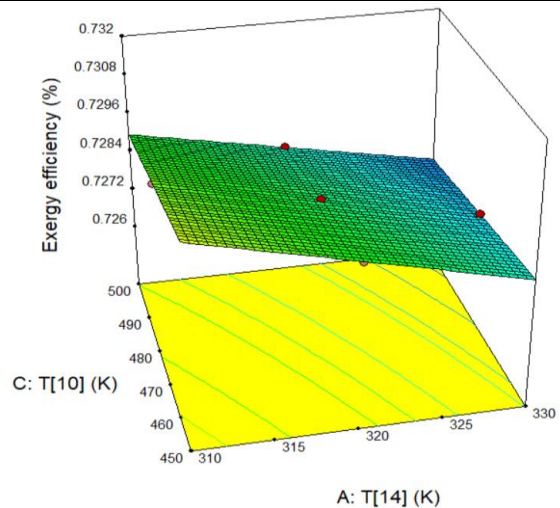
۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک تحلیل ترمودینامیکی جامع از سیستم ریفرمینگ بخار آب بیوگاز (BSR) همراه با واحد آب شیرین-کن رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا (HDH) انجام گرفته شد. همچنین، تأثیر سه متغیر (دمای ورودی رطوبت‌زدا ( $T_{14}$ )، نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ ) و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین‌کن ( $T_{10}$ )) بر بازده انرژی و انرژی و آگزرژی با روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج مهمی که در این تحقیق حاصل شده به صورت زیر خلاصه شده است:

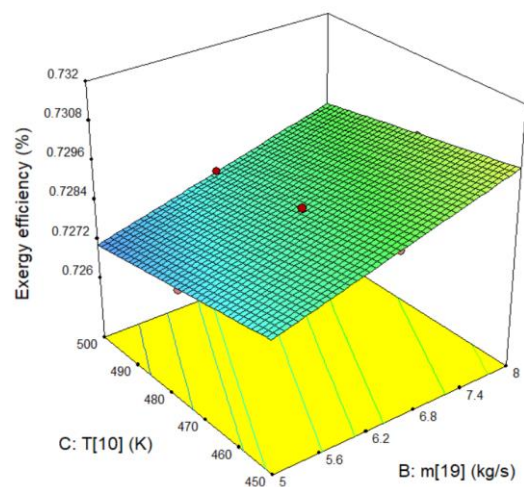
- بازده انرژی و بازده آگزرژی سیستم به ترتیب ۸۲/۳۹ و ۷۲/۶۵ درصد به دست آمده است. از سوی دیگر، نرخ دبی جرمی هیدروژن و آب شیرین به ترتیب ۱۰۷۱/۰ کیلوگرم بر ثانیه و ۲۱۱/۰ کیلوگرم بر ثانیه محاسبه شده است.

- مقدار  $P_{value}$  کمتر از ۰/۰۵ است که نشان می‌دهد مدل در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است. مقادیر  $R^2$  در پاسخ‌های بازده انرژی و آگزرژی به ترتیب ۹۹/۹۹ و ۹۹/۹۷ محاسبه شده است. مقدار  $R^2_{adj}$  برای مدل رگرسیونی بازده انرژی و بازده آگزرژی به ترتیب ۹۹/۹۸ و ۹۹/۹۴ درصد به دست آمده که نشان می‌دهد این میزان انحراف در پاسخ‌ها را می‌توان با مدل در نظر گرفته توصیف کرد. نتایج نشان داد که با افزایش دمای ورودی رطوبت‌زدا و دمای ورودی گرمکن سیستم آب شیرین‌کن بازده انرژی و آگزرژی کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا، بازده انرژی و آگزرژی افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط بررسی اثرات برهم‌کنش دو متغیر دمای ورودی رطوبت‌زدا و نرخ دبی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ )، با توجه به تغییرات شیب آن‌ها در محدوده‌های بالا و پایین، نسبت به سایر حالات برهم‌کنش بیشتری با یکدیگر دارند.

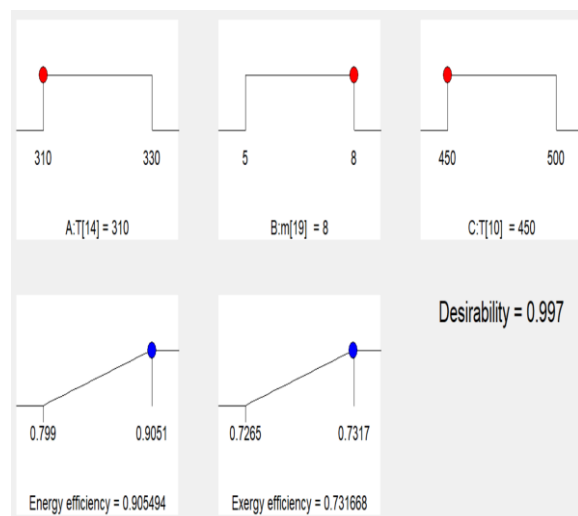
- نتایج بهینه‌سازی نشان داد که نقاط بهینه به دست آمده برای پارامترهای A، B و C و همچنین پاسخ‌های بازده انرژی و بازده آگزرژی به ترتیب ۳۱۰ کلین، ۸ کیلوگرم بر ثانیه و ۴۵۰ کلین و همچنین پاسخ‌های بازده انرژی و بازده آگزرژی در نقاط ۰/۹۰۵۱ درصد و ۰/۷۳۱۷ درصد است.



(ب)



شکل ۵- نمودار سه‌بعدی روش سطح پاسخ برهم‌کنش پارامترهای الف) دمای ورودی رطوبت‌زدا ( $T_{14}$ )، نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ )، ب) اثرات دمای ورودی رطوبت‌زدا ( $T_{14}$ ) و دمای ورودی هیتر نمک‌زدایی ( $T_{10}$ ) و ج) نرخ دبی جرمی گردش‌یافته در رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا ( $m_{19}$ ) و دمای ورودی هیتر نمک‌زدایی ( $T_{10}$ )، بر پاسخ بازده آگزرژی



۱. Lee, T.S., J. Chung, and Y.-C. Chen. ۲۰۱۱. Design and optimization of a combined fuel reforming and solid oxide fuel cell system with anode off-gas recycling. *Energy Conversion and Management*. ۵۲(۱۰): p. ۳۲۱۴-۳۲۲۶.
۲. Ghaebi, H., et al. ۲۰۱۹. Thermodynamic modeling and optimization of a combined biogas steam reforming system and organic Rankine cycle for coproduction of power and hydrogen. *Renewable energy*. ۱۳۰: p. ۸۷-۱۰۲.
۳. Gargari, S.G., M. Rahimi, and H. Ghaebi. ۲۰۱۹. Energy, exergy, economic and environmental analysis and optimization of a novel biogas-based multigeneration system based on Gas Turbine-Modular Helium Reactor cycle. *Energy Conversion and Management*. ۱۸۵: p. ۸۱۶-۸۳۵.
۴. Balat, M. ۲۰۰۸. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. *International journal of hydrogen energy*. ۳۳(۱۵): p. ۴۰۱۳-۴۰۲۹.
۵. Winter, C.-J., Hydrogen energy—Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change. *International journal of hydrogen energy*, ۲۰۰۹. ۳۴(۱۴): p. S۱-S۵۲.
۶. Kang, J.S., et al. ۲۰۰۷. Nickel-based tri-reforming catalyst for the production of synthesis gas. *Applied Catalysis A: General*. ۳۳۲(۱): p. ۱۵۳-۱۵۸.
۷. Dinçer, İ., et al. ۲۰۱۲. Hydrogen and fuel cell systems. *Sustainable Energy Systems and Applications*: p. ۵۱۹-۶۳۲.
۸. Ayati, E., et al. ۲۰۱۹. Water productivity enhancement in variable pressure humidification dehumidification (HDH) desalination systems using heat pump. *Applied Thermal Engineering*. ۱۶۰: p. ۱۱۴۱۱۴.
۹. Gao, P., L. Zhang, and H. Zhang. ۲۰۰۸. Performance analysis of a new type desalination unit of heat pump with humidification and dehumidification. *Desalination*. ۲۲۰(۱-۳): p. ۵۳۱-۵۳۷.
۱۰. Rahimi-Ahar, Z., M.S. Hatamipour, and Y. Ghalavand. ۲۰۱۸. Experimental investigation of a solar vacuum humidification-dehumidification (VHDH) desalination system. *Desalination*. ۴۳۷: p. ۷۳-۸۰.
۱۱. Ghalavand, Y., M.S. Hatamipour, and A. Rahimi. ۲۰۱۴. Humidification compression desalination. *Desalination*. ۳۴۱: p. ۱۲۰-۱۲۵.
۱۲. Narayan, G.P., et al. ۲۰۱۳. Thermodynamic balancing of the humidification dehumidification desalination system by mass extraction and injection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. ۵۷(۲): p. ۷۵۶-۷۷۰.
۱۳. Cipiti, F., et al. ۲۰۱۶. Design of a biogas steam reforming reactor: A modelling and experimental approach. *International journal of hydrogen energy*. ۴۱(۲۷): p. ۱۱۵۷۷-۱۱۵۸۳.
۱۴. Gargari, S.G., M. Rahimi, and H. Ghaebi. ۲۰۱۸. Thermodynamic analysis of a novel power-hydrogen cogeneration system. *Energy Conversion and Management*. ۱۷۱: p. ۱۰۹۳-۱۱۰۵.
۱۵. Abbasi, H.R. and H. Pourrahmani. ۲۰۲۰. Multi-criteria optimization of a renewable hydrogen and freshwater production system using HDH desalination unit and thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management*. ۲۱۴: p. ۱۱۲۹۰۳.
۱۶. Ghaebi, H. and S. Ahmadi. ۲۰۲۰. Energy and exergy evaluation of an innovative hybrid system coupled with HRSG and HDH desalination units. *Journal of Cleaner Production*. ۲۵۲: p. ۱۱۹۸۲۱.
۱۷. Merikhy, A., et al. ۲۰۲۰. Carbonized spent bleaching earth as a low-cost adsorbent: A facile revalorization strategy via response surface methodology. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. ۱۵۸: p. ۱۰۸۱۶۷.
۱۸. Mojaver, P., S. Khalilarya, and A. Chitsaz. ۲۰۱۹. Multi-objective optimization using response surface methodology and exergy analysis of a novel integrated biomass gasification, solid oxide fuel cell and high-temperature sodium heat pipe system. *Applied Thermal Engineering*. ۱۵۶: p. ۶۲۷-۶۳۹.
۱۹. Pourali, M., et al. ۲۰۲۱. Simulation of methane steam reforming in a catalytic micro-reactor using a combined analytical approach and response surface methodology. *International Journal of Hydrogen Energy*. ۴۶(۴۴): p. ۲۲۷۶۳-۲۲۷۷۶.
۲۰. Rahimi-Ahar, Z. and M.S. Hatamipour. ۲۰۲۱. Performance evaluation of a solar and vacuum assisted multi-stage humidification-dehumidification desalination system. *Process Safety and Environmental Protection*. ۱۴۸: p. ۱۳۰۴-۱۳۱۴.

۲۱. Soleymani, E., S.G. Gargari, and H. Ghaebi. ۲۰۲۱. Thermodynamic and thermoeconomic analysis of a novel power and hydrogen cogeneration cycle based on solid SOFC. *Renewable Energy*. ۱۷۷: p. ۴۹۵-۵۱۸.
۲۲. Rajaseenivasan, T. and K. Srithar. ۲۰۱۷. An investigation into a laboratory scale bubble column humidification dehumidification desalination system powered by biomass energy. *Energy Conversion and Management*. ۱۳۹: p. ۲۳۲-۲۴۴.
۲۳. Mahmoodi-Babolan, N., A. Heydari, and A. Nematollahzadeh. ۲۰۱۹. Removal of methylene blue via bioinspired catecholamine/starch superadsorbent and the efficiency prediction by response surface methodology and artificial neural network-particle swarm optimization. *Bioresource technology*. ۲۹۴: p. ۱۲۲۰۸۴.
۲۴. Soleimani, S., et al. ۲۰۲۳. Calcium alginate hydrogels reinforced with cellulose nanocrystals for methylene blue adsorption: Synthesis, characterization, and modelling. *Industrial Crops and Products*. ۱۹۲: p. ۱۱۵۹۹۹.
۲۵. Yahya, H.S.M., T. Abbas, and N.A.S. Amin. ۲۰۲۱. Optimization of hydrogen production via toluene steam reforming over Ni-Co supported modified-activated carbon using ANN coupled GA and RSM. *International Journal of Hydrogen Energy*. ۴۶(۴۸): p. ۲۴۶۳۲-۲۴۶۵۱.
۲۶. Narayan, G.P., et al. ۲۰۱۰. Thermodynamic analysis of humidification dehumidification desalination cycles. *Desalination and water treatment*. ۱۶(۱-۳): p. ۳۳۹-۳۵۳.
۲۷. Narayan, G.P., R.K. McGovern, and S.M. Zubair. ۲۰۱۲. High-temperature-steam-driven, varied-pressure, humidification-dehumidification system coupled with reverse osmosis for energy-efficient seawater desalination. *Energy*. ۳۷(۱): p. ۴۸۲-۴۹۳.
۲۸. Narayan, G.P., M.G.S. John, and S.M. Zubair. ۲۰۱۳. Thermal design of the humidification dehumidification desalination system: An experimental investigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. ۵۸(۱-۲): p. ۷۴۰-۷۴۸.
۲۹. He, W., et al. ۲۰۱۸. Thermo-economic analysis of a water-heated humidification-dehumidification desalination system with waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*. ۱۶۰: p. ۱۸۲-۱۹۰.

# Thermodynamic Analysis and Examining the Effects of Parameters in BSR-HDH System Using Response Surface Methodology

Hadi Ghaebi<sup>۱</sup> ; Elahe Soleymani<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>۲</sup> Ph. D Student, Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

## Abstract

In this paper, biogas steam reforming (BSR) coupled with a humidification dehumidification unit (HDH) was proposed and the novel thermodynamic analysis interaction effects on energy efficiency and exergy efficiency via the design of experiments was used. Comprehensive thermodynamic modelling has been performed using EES software. From the outlet results, the energy efficiency, exergy efficiency, hydrogen mass flow rate and freshwater mass flow rate of the system are obtained ۸۲,۳۹% and ۷۲,۶۵%, ۰,۱۰۷۱ kg/s and ۰,۲۱۱ kg/s, respectively. Thus, by utilizing the thermodynamic analysis of the combined system by EES software and transferring the experiments based on the central composite design for the input parameters (the inlet temperature of the dehumidifier, humidifier and dehumidifier circulated mass flow rate and the desalination heater inlet temperature) extracted by the design expert software, the results show the impact of the interaction of the input parameters. In RSM model, the central composite design (CCD) is employed in the experimental design.  $R^2$  values in energy and exergy efficiency responses were calculated ۹۹,۹۹% and ۹۹,۹۷%, respectively that shows the model has a good accuracy. The optimum points for parameters of A, B and C and also responses of energy efficiency and exergy efficiency are obtained ۳۱۰ K, ۸ kg/s, ۴۵۰ K, ۰,۹۰۵% and ۰,۷۳۱۳%, respectively.

## Introduction

Hydrogen, a very versatile fuel, can be produced from various materials and by several methods. Industrial-scale production of hydrogen has been operational in the oil and gas industry for more than a century and forms the base of the modern chemical industry. In centralized facilities and distributed generation, hydrogen has to be supplied to stationary fuel cell applications from nearby hydrogen mass-production processes. There are three established methods for reforming fuels: steam reforming (SR), partial oxidation (POX) and auto-thermal reforming (ATR). All of the mentioned methods produce a syngas mixture; however, the difference in reaction temperatures and oxidants yields different CO concentrations in the syngas mixture. The  $H_2$  production generally decreases in the order of steam reforming, auto-thermal reforming and partial oxidation [۱]. Biogas is used as the most practical renewable energy source in place of fossil fuels for power and hydrogen production which has a main role in the minimization of global warming. Biogas can be achieved by biomass anaerobic fermentation and decomposition which itself is composed of different organic materials, namely, ۶۰-۷۰% methane, ۳۰-۴۰% carbon dioxide, and other negligible gases such as hydrogen, nitrogen, oxygen, mono oxide, and hydrogen sulphide. Therefore, due to the high contribution of carbon dioxide and methane (greenhouse gases) in biogas mixtures, one can effectively utilize them in various reforming processes to produce hydrogen [۲].

Many countries have initiated their programs for large-scale exploitation of biogas resources. This requires many investigations and scholars' efforts to model recovery processes from municipal and industrial waste for producing electricity or other forms of commodities [۳]. In recent years, hydrogen as clean energy has been considered for energy production which is compatible with the environment and widely used in chemical and power plant industries [۴, ۵]. In addition, hydrogen can be effectively converted to electricity by fuel cell systems with negligible greenhouse effects, or vice versa [۶, ۷].

The scarcity of fresh water is one of the major problems that engulf challenges in human societies. This has a major impact on population growth and economics. It is predicted that by ۲۰۲۵, nearly ۷۰% of the world's population will suffer from problems with freshwater shortage. One of the manners to compensate for this shortage is by improving desalination technologies at the industrial and domestic scales. HDH is one of the main techniques in water desalination processes. This method is more appropriate for household scales than other thermal desalination processes due to its benefits like less operating costs at low capacities, working in moderate operating conditions, and lack of sensitivity to the quality of inlet saline water in comparison with membrane desalination processes [۲۰]. Different researchers in this field offered various designs of HDH processes to improve the performance of conventional HDH systems, including hybrid humidification dehumidification-heat pump (HDHHP) [۲۱], vacuum humidification dehumidification (VHDH) processes [۲۲], humidification compression (HC) [۲۳], and injection-extraction technologies [۲۴]. A biogas steam reforming system is proposed by Cipiti et al. [۸] in a temperature range of ۷۰۰ - ۹۰۰ °C, where theoretical and empirical studies are performed. Based on their results, the increment of the temperature and steam-to-carbon molar ratio can improve the hydrogen generation rate. Gargari et al. [۹] proposed a new hybrid system for power and hydrogen generation purposes using a combination of a Gas Turbine-Modular Helium Reactor (GT-MHR) as a topping system for power production and biogas steam reforming as the bottoming cycle for hydrogen production. A comprehensive thermodynamic analysis, as well as the parametric study, is performed to investigate the feasibility of the proposed system. Based on their obtained results, the power generation and hydrogen production capacity of their hybrid GT-MHR/BSR plant were calculated ۲۶۰,۱۳ MW and ۰,۲۱۷ kg/s, respectively. Abbasi and Pourrahmani [۲۷] proposed a novel geothermal integrated system with two different configurations to produce freshwater and hydrogen. The results of the exergy destruction and exergy destruction cost rates for both configurations indicated that TEG has the highest values, among other components. Kalina cycle and the HDH unit have the least exergy destructions in the current cycle. Also, optimization studies revealed that the optimal mode is superior in terms of exergy efficiency, freshwater cost, and hydrogen cost with the values of ۲۲,۴۹%, ۲,۹۴ \$/m<sup>۳</sup> and ۷,۳۷ \$/kg, respectively. Ghaebi and Ahmadi [۲۸] introduced an innovative hybrid system coupled with HRSG and HDH desalination units. The outcomes exhibit that the introduced trigeneration system generates heating load, net electricity, and distilled water of ۳۷۰,۲ kW, ۱۶۰,۵ kW, and ۳۴۵,۷۰۸ kg/h, respectively. Based on this scenario, the trigeneration energetic and exergetic efficiencies are computed ۸۵,۵۶% and ۶۳,۰۴%, respectively. Additionally, among all elements, the SOFC stack and afterburner are recognized as the most destructive components by ۲۳۳,۳ kW and ۱۷۳,۳ kW, respectively. An exhaustive parametric evaluation is carried out through the study and it is figured out that the main factors of the system can have a maximum point in terms of the fuel utilization factor, desalination flow ratio, and desalination maximum temperature. The full trial design is not cost and time effective. The design of experiments (DOE) method is a useful approach to minimize time, cost, and the number of trials. DOE methods are utilized to optimize response variables in the presence of various factors with different levels. DOE is the application of geometric principles to statistical sampling to obtain desired results. Achieving the desired response with the lowest number of trials is the most important objective in DOE [۲۲, ۲۳]. DOE enables the simultaneous study of several factors and assessment of their statistical significance, as well as the evaluation of interaction effects. Response surface methodology (RSM) is a powerful tool for experimental design, analyzing, modeling, and optimization of any multivariable system and also is one of the most applicable DOE methods [۲۶]. One of the most valuable outputs of RSM is to present a regression model to predict the response variable based on the considered input parameters. Multi-objective optimization performance is another important tool of RSM that is used in many engineering applications [۲۳]. For instance, Mostafa Pourali et al. [۲۴] performed a comprehensive investigation to study the effects of various design parameters on CH<sub>4</sub> conversion in a catalytic microchannel for hydrogen production. the RSM is employed to study the effects of channel height, inlet velocity and temperature, wall thickness and conductivity, and external

heat flux on CH<sub>4</sub> conversion. It is found that the inlet gas temperature, among different parameters, has the most influence on the overall performance of the microchannel hydrogen production. Also, the maximum necessary heat of reforming reaction increases by ۸۴% and ۲۶% if the CH<sub>4</sub> conversion changes from ۵۰% to ۶۰% and ۶۰% to ۷۰%, respectively. Rahimi-Ahar and Hatamipour. [۳۶] compared the freshwater productivity of a three-stage vacuum humidification-dehumidification (VHDH) desalination system to a single-stage VHDH system using the response surface methodology (RSM). The optimal values of saline water to air mass flow rate ratio (sw/a) and humidifier pressure (P<sub>H</sub>) of ۱,۷۷ and ۳۳ kPa led to the maximum freshwater productivity. In all operating conditions, through converting the single-stage humidification to two-stage and three-stage humidification processes, the humidity ratio was enhanced by about ۵۱% and ۱۹%, respectively. In the present study, a comprehensive energy and exergy analysis of a biogas steam reforming system combined with a HDH for hydrogen and fresh water coproduction is performed. Although several studies were reported using RSM in different engineering problems, the application of RSM in performance evaluation of the co-generation system is scarce, which offers another scope for the present study. Regression models using RSM are presented to estimate the output parameters and the effect of considered parameters and their interactions are studied on the output parameters. The motivation and objective of the current study are:

- To present a comprehensive thermodynamic modelling of the proposed system based on the first and second laws of thermodynamics.
- To examine the effects of input parameters on each other and output parameters via the response surface method.

To optimize the proposed system by considering energy and exergy efficiencies as objective functions, using RSM.

## Methodology

Comprehensive thermodynamic modeling has been performed using EES software. Regression models using RSM are presented to estimate the output parameters and the effect of considered parameters and their interactions are studied on the output parameters.

## Results and Discussion

In this part, the obtained results of the thermodynamic analyses for the proposed system are presented based on the design conditions, assumptions, and governing equations. The main results of the proposed system are presented that shows the energy efficiency and exergy efficiency of the system are obtained ۸۲,۳۹% and ۷۲,۶۵%, respectively. Furthermore, Under the given conditions, hydrogen mass flow rate and fresh water mass flow rate are calculated ۰,۱۰۷۱ kg/s and ۰,۲۱۱ kg/s, respectively. A p-value less than ۰,۰۵ indicates that the model is significant at ۹۵% of confidence level. R<sup>۲</sup> values in energy and exergy efficiency responses were obtained ۹۹,۹۹% and ۹۹,۹۷%, respectively. R<sup>2</sup><sub>adj</sub> values for the regression model energy efficiency and exergy efficiency are ۹۹,۹۸% and ۹۹,۹۴%, respectively. It shows this amount of variation in the responses can be described by the considered model.

## Conclusion

In this study, a comprehensive thermodynamic analysis of the system including the Biogas steam reforming (BSR) coupled with humidification dehumidification unit (HDH) was performed. Also, the effects of three variables (the inlet temperature of dehumidifier, humidifier and dehumidifier circulated mass flow rate and the desalination heater inlet temperature) on energy and exergy

efficiency were examined via response surface methodology. The main highlights of this work can be summarized as follows:

- The energy efficiency and exergy efficiency of the system are obtained ۸۲,۳۹% and ۷۲,۶۵%, respectively. On the other hand, hydrogen mass flow rate and fresh water mass flow rate are calculated ۰,۱۰۷۱ kg/s and ۰,۲۱۱ kg/s, respectively.
- The p-value is less than ۰,۰۵ indicating that the model is significant at ۹۵% of confidence level.  $R^2$  values in energy and exergy efficiency responses were calculated ۹۹,۹۹% and ۹۹,۹۷%, respectively.  $R_{adj}^2$  value for the regression model of energy efficiency and exergy efficiency are obtained ۹۹,۹۸% and ۹۹,۹۴%, respectively, which shows this amount of variation in the responses can be described by the considered model.
- The results showed that by increasing the inlet temperature of the dehumidifier and the desalination heater inlet temperature, energy and exergy efficiency decrease and also by augmenting the humidifier and dehumidifier circulated mass flow rate, the energy and exergy efficiency increases. Also compared to other states, in the condition of the interaction between the inlet temperature of dehumidifier and humidifier and dehumidifier circulated mass flow rate ( $m_{\text{in}}$ ), these variables have more interaction with each other based on their slope changes in the upper and lower ranges.
- The results of optimization illustrated that the obtained optimized points for parameters of A, B and c and also responses of energy efficiency and exergy efficiency are ۳۱۰ K, ۸ kg/s, ۴۵۰ K, ۰,۹۰۵% and ۰,۷۳۱۳%, respectively.

### Keywords

Biogas steam reforming, Humidification-dehumidification unit, Thermodynamic, Response surface methodology and Central composite design.