

تحلیل انرژی - اقتصادی سیستم تولید همزمان توان و گرما از بیوگاز تصفیه خانه فاضلاب (مطالعه موردی تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران)

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، h.ravaee@urmia.ac.ir

حمزه روایی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، sm.pesteei@urmia.ac.ir

سید مهدی پسته‌ای*

چکیده

در سال‌های اخیر با توجه به افزایش جمعیت شهری و نیاز به توسعه تصفیه خانه‌های فاضلاب از یک سو و بحران انرژی از سوی دیگر، بیوگاز حاصل از لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب به یک منبع مهم جهت تولید انرژی تبدیل شده است. بنابراین طراحی، ساخت و بهره برداری واحدهای تولید توان و گرما در تصفیه خانه‌های فاضلاب ضروری به نظر می‌رسد. هدف این پژوهش تحلیل انرژی اقتصادی سیستم تولید همزمان توان و گرما از بیوگاز تولیدی در تصفیه خانه فاضلاب می‌باشد. برای این منظور نیروگاه تولید توان و گرمای تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران به صورت مورد مطالعه قرار گرفته است. معادلات انرژی و اقتصادی برای اجزای سیستم استخراج و سپس با استفاده از نرم افزار EES حل شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین تخریب انرژی سیستم در مخزن ذخیره گاز اتفاق می‌افتد. توان خالص تولیدی سیستم برابر ۱۴۵۲ کیلووات و بازده انرژی آن حدود ۵۳٪ است. نرخ هزینه سیستم برابر ۱۱۷/۷ دلار بر ساعت و دوره بازگشت سرمایه آن برابر ۴/۲ سال و وابسته به حالت بهره برداری است.

واژه‌های کلیدی: تصفیه خانه فاضلاب، بیوگاز، توان، گرما، انرژی، اقتصادی.

Exergoeconomic Analysis of Power and Heat Cogeneration System from Biogas of Waste Water Treatment Plant (Case Study: South Tehran Waste Water Treatment Plant)

H. Ravaei
S. M. Pesteei

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Abstract

In recent years, due to the increase in the urban population and the need to develop sewage treatment plants on the one hand and the energy crisis on the other hand, biogas obtained from the sludge of wastewater treatment plants has become an essential resource for energy production. Therefore, the design, construction, and operation of power and heat production units in wastewater treatment plants are essential. This research aims to analyze the exergoeconomic of a system of combined heat and power production (CHP) from biogas produced in the wastewater treatment plant. For this purpose, the power and heat generation plant of a sewage treatment plant in the south of Tehran has been studied as a case study. The exergy and economic equations for the system's components are extracted and solved using EES software. This research showed that the system's most exergy destruction occurs in the gas storage tank. The system's net production power is 1452 kW, and its energy efficiency is about 53%. The cost rate of the system is 117.7(\$/h), and its return period is 4.2 years, which means that the system's payback depending on the operating mode.

Keywords: Waste Water Treatment Plant (WWTP), Biogas, Power, Heat, Exergy, Economic.

۱- مقدمه

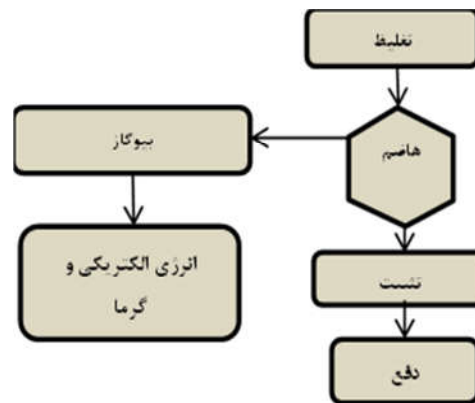
نوع گاز بیوگاز و گازهای سنتزی تولید می‌شود که سین گاز با فرآیند گاز و بیوگاز با استفاده از فرآیند هضم در هاضم تولید می‌گردد [۲]. بخش‌های کلی فرآیندهای تصفیه لجن در تصفیه خانه‌های فاضلاب شامل تغلیظ، هضم، تثبیت و دفع می‌باشد. که روندنمای این فرآیندها در شکل ۱ نشان داده شده است. در هضم بی‌هوای لجن تصفیه خانه فاضلاب، بخشی از مواد آلی به بیوگاز تبدیل می‌شوند و مقدار لجن دفع شده به میزان قابل توجهی کاهش یافته و پاتوژن‌ها و بوی بد لجن نیز از بین می‌رود [۳]. از آنجایی که بیوگاز تولیدی می‌تواند به عنوان سوخت در چرخه‌های تولید همزمان

در جهان امروز از یک سو رشد جمعیت و نیاز روزافزون بشر به انرژی برای انجام کارهای روزمره خود و از سوی دیگر کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، بشر را ناچار به استفاده از انرژی‌های جدید برای تولید انرژی الکتریکی مورد نیاز خویش کرده است. یکی از روش‌های نوین تولید انرژی الکتریسیته، بهره‌گیری از انرژی زیست‌توده با استفاده از لجن تصفیه خانه فاضلاب است که به طور قابل توجهی توجه پژوهشگران را به خود اختصاص داده است. روزانه مقادیر قابل توجهی لجن در تصفیه خانه‌های فاضلاب تولید و دفع می‌شوند که دفع آن‌ها اثرات مخرب زیست‌محیطی به دنبال دارد. هنر مدیریت فاضلاب‌های شهری، تبدیل تهدیدهای زیست محیطی و اقتصادی فاضلاب شهری به فرصت‌هایی نظیر ایجاد درآمد و اشتغال و در عین حال بهداشتی و دوست دار محیط زیست بودن این فعالیت‌هاست [۱]. از زیست توده دو

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: sm.pesteei@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲/۱۱/۱۳

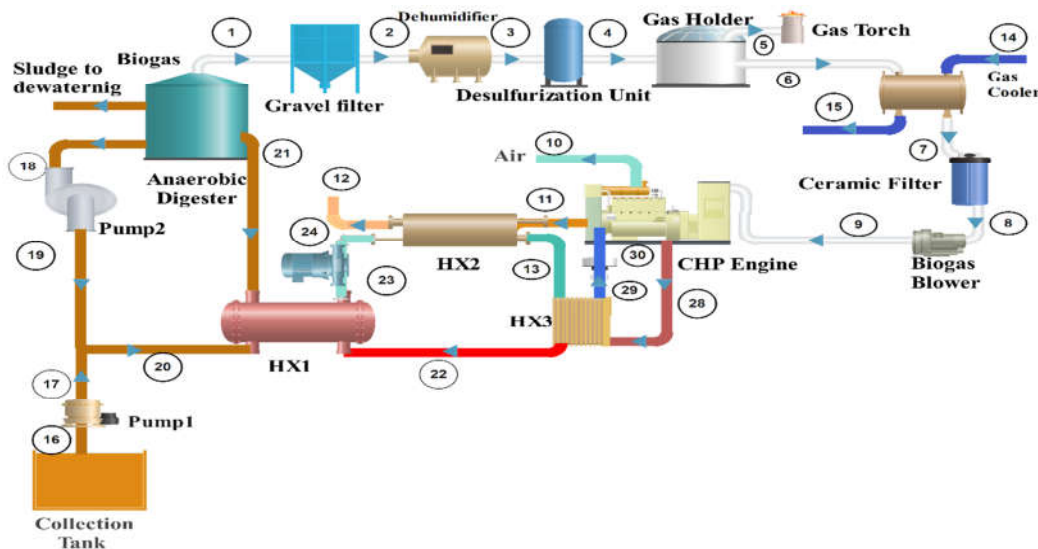
تاریخ پذیرش: ۳/۰۴/۱۱



شکل ۱- فرآیندهای کلی تصفیه لجن در تصفیه خانه های فاضلاب

گرما و انرژی مورد استفاده قرار گیرد. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. بریزی و همکاران [۴]، در برزیل کاربرد بیوگاز و گاز طبیعی را به عنوان سوخت سیستم های تولید همزمان را به لحاظ اقتصادی و انرژی مورد بررسی و آزمایش قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که در یک دوره بازگشت سرمایه ۵ ساله، استفاده بیوگاز نسبت به گاز طبیعی اقتصادی‌تر است. اوزدیل و همکاران [۵]، عملکرد کلی یک سیستم CHP را در یک تصفیه خانه فاضلاب شهری واقع در آدنا ترکیه را از چشم انداز انرژی و اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. همچنین بازده تولید الکتریسیته بر اساس بیوگاز تولید شده مورد مطالعه قرار گرفت. در این سیستم پیشنهادی، بیشترین اتلاف انرژی در موتور گاز رخ می‌داد. صغری و همکاران [۶]، یک سیستم تولید چند گانه زیست توده منسجم جدید را توسعه و بسط دادند. تولید قدرت، گرما، هیدروژن و نمک زدایی به عنوان خروجی‌های این سیستم در نظر گرفته شده بود. سیستم پیشنهادی نشان داد که بازده انرژی کلی و انرژی به ترتیب می‌تواند ۶۳٪ و ۴۰٪ باشد. دی فرایا و همکاران [۷]، تحلیل‌هایی را از دیدگاه انرژی، انرژی و اقتصادی برای تولید الکتریسیته و گرما از منابع انرژی زمین گرمایی در یک تصفیه خانه فاضلاب و فرآیند تصفیه لجن ترتیب دادند. یک چرخه ارگانیک رانکین (ORC) برای تولید توان و تأمین بارهای گرمایی به منظور خشک کردن لجن از منابع زمین گرمایی آنتالپی کم تا متوسط پیشنهاد گردید. سیستم ارائه شده تمام انرژی الکتریکی مورد تقاضای تصفیه خانه را پوشش می‌داد. دوره بازگشت سرمایه نیز تقریباً برای سیستم پیشنهادی ۵ سال بدست آمد. صابری مهر و همکاران [۸]، استفاده از موتور بیوگاز را در تصفیه خانه فاضلاب شهری کاشان پیشنهاد نموده و هزینه احداث دو واحد نیروگاه بیوگاز در این تصفیه خانه را ۲۷۰۰۰۰ دلار برآورد کردند، همچنین دوره بازگشت سرمایه را برابر ۴ سال محاسبه نمودند. کمپلو و همکاران [۹]، به بررسی دوره بازگشت سرمایه در تولید توان از تصفیه خانه‌های فاضلاب برزیل پرداختند و نشان دادند که دوره بازگشت سرمایه به شدت به نترات تحت پوشش یا دبی ورودی تصفیه خانه وابسته است. تمجیدی فرحبخش و همکاران [۱۰]، یک سیستم جدید تولید همزمان

برای تصفیه خانه های فاضلاب ارائه نمودند که به بررسی عملکرد چرخه از نظر انرژی و انرژی و اکونومیک پرداخته بودند. به منظور افزایش راندمان الکتریکی سیستم ترکیب چرخه میکروتوربین گازی و چرخه ارگانیک رانکین مورد ارزیابی قرار گرفت. آنان نشان دادند که با بهینه‌سازی سیستم راندمان انرژی الکتریکی سیستم افزایش می‌یابد در حالی که دوره بازگشت سرمایه کاهش و شاخص سود نیز افت پیدا می‌کند. صنایع و همکاران [۱۱]، به تحلیل انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست محیطی تولید توان در واحدهای ۱ تا ۴ تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران که با استفاده از ۶ هاضم و ۴ موتور تولید همزمان مورد بهره برداری قرار می‌گیرد، پرداختند. آنها بازده انرژی، انرژی و دوره بازگشت سرمایه را به ترتیب برابر با ۲۴/۳٪، ۱۷/۳٪ و ۲/۴ سال محاسبه نمودند. حاجی محمد تبریز و همکاران [۱۲]، تحلیل چند منظوره واحد تولید توان تصفیه خانه فاضلاب در ترکیه را که از توربین گاز جهت تولید توان و از گرمای اتلافی جهت تولید هیدروژن و آب شیرین استفاده می‌نمود، انجام دادند. صغری و همکاران [۱۳]، به ارزیابی اقتصادی و بهینه سازی یک سیستم تولید همزمان توان و گرما با استفاده از گاز ناشی از سوزاندن لجن فاضلاب شهری پرداختند و توانستند راندمان سیستم را در حدود ۲٪ افزایش دهند. با توجه به پژوهش‌های انجام شده، تاکنون در هیچ یک از آن‌ها به در نظر گرفتن حالت بهره برداری سیستم در عملکرد سیستم پرداخته نشده است و همگی آنها سیستم را در حالت طراحی یا با فرض آرمانی در حال کار بودن تمامی تجهیزات، مورد مطالعه قرار داده اند. در این پژوهش به مدل‌سازی ترمودینامیکی نیروگاه بیوگاز واحد ۵ و ۶ تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران پرداخته می‌شود. هدف از این مدل‌سازی ارزیابی عملکرد این نیروگاه در تولید همزمان توان الکتریکی و گرما با استفاده از موتور احتراق داخلی می‌باشد. تا بتوان در جهت اصلاح سیستم و ارائه پیشنهاد جهت توسعه سیستم اقدام نمود. برای این منظور برای نخستین بار چرخه تولید توان با موتور احتراق داخلی به همراه بخش گرمایش لجن ورودی به هاضم‌ها مدل‌سازی شده و نتایج به دست آمده است. ابتدا میزان گاز تولیدی در هاضم بر حسب مقدار لجن خام ورودی و دمای هاضم با استفاده از اطلاعات تجربی محاسبه شده و برای آن یک تقریب مناسب در نظر گرفته شده‌است. سپس برای واقعی‌تر شدن مدل‌سازی، حالت‌های بهره برداری مختلف با توجه به تعداد موتورها و هاضم‌ها در نظر گرفته شده‌است و دو حالت بر این اساس مورد بررسی قرار گرفته و برای هر کدام محاسبات تکرار شده‌است. تخریب انرژی تمام اجزای چرخه محاسبه شده و مهم‌ترین اجزای چرخه از این منظر مشخص شده‌اند. سپس تحلیل اقتصادی سیستم انجام شده و در آن دوره بازگشت سرمایه، نرخ هزینه اجزای چرخه و نرخ هزینه به ازای تخریب انرژی محاسبه شده‌اند. در نهایت با توجه به بازده انرژی، انرژی و نرخ هزینه تاثیر حالت مناسب بهره برداری سیستم در عملکرد سیستم تعیین شده و اهمیت آن نشان داده شده است.



شکل ۲- طرحواره بخش توان و گرما در واحد ۶۵ تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران

۲- تشریح سیستم

تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران برای تصفیه بخشی از فاضلاب جمع آوری شده شهر تهران، شامل ۸ واحد و جمعیتی معادل ۴ میلیون و ۲۰۰ هزار نفر در نظر گرفته شده است، که ظرفیت متوسط فاضلاب ورودی آن ۹۰۰ هزار مترمکعب در روز می‌باشد که در حال حاضر ۶ واحد آن به بهره برداری کامل رسیده و دارای واحد تولید توان فعال و واحدهای ۷ و ۸ در حال ساخت است. این تصفیه خانه اولین و بزرگترین تصفیه خانه فاضلاب در خاورمیانه می‌باشد. بخش تولید توان این تصفیه خانه بر این اساس عمل می‌کند که لجن تولیدی در فرآیندهای تصفیه فاضلاب، وارد هاضم بی‌هوای^۱ [۱۴] می‌شود. و بر اساس فرآیندهای بیولوژیکی که در هاضم اتفاق می‌افتد از آن گاز متان استخراج می‌گردد، سپس این گاز وارد موتور احتراقی می‌گردد، با احتراق گاز در این موتور، که به صورت یک واحد موتور ژنراتور می‌باشد و تحت عنوان CHP شناخته می‌شود، هم توان الکتریکی تولید می‌شود و هم از گرمای گاز خروجی آن برای گرمایش لجن ورودی به هاضم استفاده می‌گردد.

در این پژوهش به مدل‌سازی بخش تولید گاز و تولید توان واحد ۶۵ تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران پرداخته می‌شود که جزئیات و طرحواره چرخه آن در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است برای تولید گاز در هاضم بی‌هوای بخشی از لجن درون هاضم (نقطه ۱۸) به ورودی پمپ شده (نقطه ۱۹) و با لجن ورودی از تانک ذخیره (نقطه ۱۶) مخلوط می‌گردد که این به دو دلیل می‌باشد: ۱- میزان تغذیه میکروبهای درون هاضم از لجن جدید تامین گردد (دلیل بیولوژیکی).

۲- دمای ترموفیلیک مورد نیاز برای رشد باکتریهای منجر به تولید گاز متان در هاضم که (۳۵ تا ۳۷ درجه سلسیوس) همواره تامین گردد. (دلیل ترمودینامیکی).

لجن در گردش هاضم و لجن ورودی از تانک ذخیره لجن پس از مخلوط شدن (نقطه ۲۰) با استفاده از آبگرم حاصل از گرمای موتورهای احتراقی در یک مبادله کن گرمایی لوله‌ای گرم شده (نقطه ۲۱) و سپس وارد هاضم می‌شوند. این فرآیند باید به گونه ای صورت پذیر تا دمای درون هاضم در حدود ۳۷ سلسیوس ثابت بماند. درون هاضم بیوگاز که حدود ۶۵٪ آن متان و ۳۵٪ آن دی‌اکسید کربن است تولید می‌گردد (نقطه ۱) گاز تولید شده ممکن است شامل مقداری مواد جامد معلق باشد که این مواد در فیلتری موسوم به گراول فیلتر به صورت فیزیکی از گاز جدا می‌شوند (نقطه ۲) سپس رطوبت گاز گرفته می‌شود (نقطه ۳) و سپس بیوگاز وارد برج سولفور زدایی شده و میزان H_2S آن تا حدود ۲۰۰ ppm کاهش می‌یابد (نقطه ۴). در این مرحله گاز در مخزن ذخیره گاز ذخیره می‌گردد و با توجه به میزان مصرف در موتورها سوزانده شده و یا فلر می‌شود (نقطه ۵). گازی که می‌خواهد وارد موتورها شود، ابتدا توسط خنک کن (نقطه ۶) خنک شده و پس از عبور از سرامیک فیلترها، فشار آن توسط دمنده گاز به فشار کاری موتور (فشار آن از حدود ۱۵ میلی بار تا حدود ۱۴۰ میلی بار افزایش می‌یابد) می‌رسد. در این مرحله گاز وارد موتور احتراقی شده و درون موتور با هوا ترکیب و عمل احتراق صورت می‌گیرد. از گازهای احتراق در مبادله کن گرمایی لوله‌ای و از گرمای آب خنک کن موتور در یک مبادله کن گرمایی صفحه‌ای جهت گرمایش آب مدار گرم (که جهت گرم کردن لجن در مبادله کن گرمایی به کار می‌رود) استفاده می‌شود.

در قسمت بعدی برای مدل‌سازی ترمودینامیکی سیستم، ابتدا معادلات قانون اول و دوم ترمودینامیک و تحلیل اقتصادی برای اجزای سیستم استخراج و سپس با حل معادلات در نرم افزار EES بازده قانون اول و دوم چرخه و همچنین پارامترهای تحلیل اقتصادی آن به دست آمده است.

¹ Anaerobic Digester

۲-۱- فرضیات مدل سازی ترمودینامیکی سیستم

برای سادگی کار، در فرآیند استخراج و حل معادلات ترمودینامیکی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- (۱) همه فرآیندها در حالت پایا رخ می‌دهند.
- (۲) میزان گاز تولیدی در هر هاضم ثابت و برابر ۰/۰۶۷ کیلوگرم بر ثانیه فرض شده است (شکل ۳).
- (۳) هوا و گازهای حاصل از احتراق گاز کامل در نظر گرفته شده‌اند.
- (۴) از افت فشار در مبادله‌کن‌های گرمایی، لوله‌ها و سایر قسمت‌های سیستم صرف‌نظر شده‌است.
- (۵) تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی ناچیز در نظر گرفته شده است.
- (۶) چون فرآیند هاضم بی‌هوایی بخشی از فرآیند تصفیه لجن تصفیه خانه فاضلاب می‌باشد، ارزش اقتصادی لجن ورودی به سیستم صفر فرض شده است.
- (۷) ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی برابر ۲۲۱۷۸ کیلوژول بر کیلوگرم منظور شده است [۱۵].
- (۸) خواص ترمودینامیکی لجن، با خواص ترمودینامیکی آب یکسان در نظر گرفته شده‌است [۱۶].
- (۹) دمای محیط ثابت است و از تغییرات بارگرمایی هاضم در اثر تغییر دمای محیط صرف‌نظر می‌شود.
- (۱۰) برای محاسبه انرژی کلی لجن فاضلاب از معادله (۱) به صورت زیر استفاده شده است [۱۶]:

$$ex_{SS}^{Total} = ex_{SS}^{CH} + ex_{SS}^{Ph} \quad \left(\frac{KJ}{Kg}\right) \quad (1)$$

۲-۲- معادلات انرژی و انرژی سیستم

برای محاسبه بازده انرژی و انرژی و انرژی در این سیستم دو حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول بازده انرژی و انرژی برای چرخه تولید توان و گرما حساب شده و با نماد $\eta_{I,cycle}$ و $\eta_{I,sys}$ نشان داده شده‌اند و در حالت دوم این دو کمیت با در نظر گرفتن بخش هاضم و تولید گاز حساب شده و با نماد $\eta_{II,cycle}$ و $\eta_{II,sys}$ نشان داده شده‌اند. بازده انرژی چرخه و سیستم به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\eta_{I,cycle} = \frac{W_{net} + Q}{m_6 * LHV_{biogas}} \quad (2)$$

$$\eta_{I,sys} = \frac{W_{net}}{m_{16} * LHV_{sludge}} \quad (3)$$

$$\eta_{II,cycle} = \frac{W_{net} + Q}{m_6 * ex_{biogas}} \quad (4)$$

$$\eta_{II,sys} = \frac{W_{net}}{m_{16} * ex_{studge}} \quad (5)$$

که در این روابط W_{net} از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$W_{net} = W_{CHP} - W_{dig} - W_{pump1} - W_{pump2} - W_{pump3} - W_{pump4} - W_{blower} - W_{DS} \quad (6)$$

و Q مقدار گرمایی است که قابل بازیافت و استفاده برای گرمایش لجن می‌باشد. معادلات تعادل انرژی برای اجزای سیستم در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- معادلات تخریب انرژی اجزای سیستم

تجهیز	معادله انرژی
هاضم	$\dot{E}x_{21} + \dot{W}_{dig} = \dot{E}x_1 + \dot{E}x_{18} + \dot{E}x_{studge} + ED_{dig}$
گراول فیلتر	$\dot{E}x_1 = \dot{E}x_2 + ED_{GF}$
مبادله کن گرما ۱	$\dot{E}x_{20} + \dot{E}x_{22} = \dot{E}x_{21} + \dot{E}x_{23} + ED_{HX1}$
مبادله کن گرما ۲	$\dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{25} = \dot{E}x_{13} + \dot{E}x_{26} + ED_{HX2}$
مبادله کن گرما ۳	$\dot{E}x_{26} + \dot{E}x_{28} = \dot{E}x_{27} + \dot{E}x_{29} + ED_{HX3}$
پمپ ۱	$\dot{E}x_{16} + W_{p1} = \dot{E}x_{17} + ED_{p1}$
پمپ ۲	$\dot{E}x_{18} + W_{p2} = \dot{E}x_{19} + ED_{p2}$
پمپ ۳	$\dot{E}x_{23} + W_{p3} = \dot{E}x_{24} + ED_{p3}$
پمپ ۴	$\dot{E}x_{29} + W_{p4} = \dot{E}x_{30} + ED_{p4}$
رطوبت گیر گاز	$\dot{E}x_3 = \dot{E}x_4 + ED_{DHF}$
زدایی سولفور	$\dot{E}x_4 + \dot{W}_{DS} = \dot{E}x_5 + ED_{DS}$
گاز مخزن	$\dot{E}x_5 = \dot{E}x_6 + \dot{E}x_{Flared\ gas} + ED_{GH}$
خنک کن گاز	$\dot{E}x_6 + \dot{E}x_{14} = \dot{E}x_7 + \dot{E}x_{15} + ED_{GC}$
سرامیک فیلتر	$\dot{E}x_7 = \dot{E}x_8 + ED_{CF}$
بلوئر گاز	$\dot{E}x_8 + \dot{W}_{blower} = \dot{E}x_9 + ED_{BI}$
موتور	$\dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{30} = \dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{28} + \dot{W}_{CHP} + ED_{CHP}$

۳-۲- معادلات انرژی اقتصادی

معادله انرژی اقتصادی برای تک تک اجزای سیستم را می‌توان با استفاده از رابطه اصلی زیر به دست آورد [۱۷]:

$$\sum \dot{C}_{in,i} + \dot{Z}_i = \sum \dot{C}_{out,i} + \dot{C}_i^w + \dot{C}_i^Q \quad (5)$$

این روابط برای تک تک اجزای سیستم استخراج و در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. برای محاسبه دوره بازگشت سرمایه از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$PB = \frac{TDI}{ANCF} \quad (6)$$

که در این رابطه TDI هزینه اولیه سرمایه‌گذاری بوده و ANCF در آمد:

جدول ۳- معادلات موازنه اقتصادی اجزای سیستم

تجهیز	معادلات
هاضم	$\dot{C}_{21} + \dot{Z}_{dig} + \dot{C}_{w,dig} = \dot{C}_1 + \dot{C}_{18} + \dot{C}_{sludge}$
گراول فیلتر	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_{GF} = \dot{C}_2$
مبادله کن گرما ۱	$\dot{C}_{20} + \dot{C}_{22} + \dot{Z}_{HX1} = \dot{C}_{21} + \dot{C}_{23}$
مبادله کن گرما ۲	$\dot{C}_{12} + \dot{C}_{25} + \dot{Z}_{HX2} = \dot{C}_{13} + \dot{C}_{26}$
مبادله کن گرما ۳	$\dot{C}_{26} + \dot{C}_{28} + \dot{Z}_{HX3} = \dot{C}_{27} + \dot{C}_{29}$
پمپ ۱	$\dot{C}_{16} + \dot{C}_{w,p1} + \dot{Z}_{p1} = \dot{C}_{17}$
پمپ ۲	$\dot{C}_{18} + \dot{C}_{w,p2} + \dot{Z}_{p2} = \dot{C}_{19}$
پمپ ۳	$\dot{C}_{23} + \dot{C}_{w,p3} + \dot{Z}_{p3} = \dot{C}_{24}$
پمپ ۴	$\dot{C}_{29} + \dot{C}_{w,p4} + \dot{Z}_{p4} = \dot{C}_{30}$
رطوبت گیر گاز	$\dot{C}_3 + \dot{Z}_{Dh} = \dot{C}_4$
زدایی سولفور	$\dot{C}_4 + \dot{C}_{w,DS} + \dot{Z}_{DS} = \dot{C}_5$
گاز مخزن	$\dot{C}_5 + \dot{Z}_{GH} = \dot{C}_6 + \dot{C}_{Flared\ gas}$
خنک کن گاز	$\dot{C}_6 + \dot{C}_{14} + \dot{Z}_{GC} = \dot{C}_7 + \dot{C}_{15}$
سرامیک فیلتر	$\dot{C}_7 + \dot{Z}_{CF} = \dot{C}_8$
بلوئر گاز	$\dot{C}_8 + \dot{C}_{w,blower} + \dot{Z}_{Bl} = \dot{C}_9$
موتور	$\dot{C}_{11} + \dot{C}_{30} + \dot{Z}_{CHP} = \dot{C}_{12} + \dot{C}_{28} + \dot{C}_{w,CHP}$

جدول ۴- نتایج کار حاضر و اوزدیل و همکاران [۵]

خطای نسبی (%)	کار حاضر	اوزدیل و همکاران	بازده قانون دوم (%)
۱/۵	۷۰/۲	۶۹/۱۰	بازده قانون دوم (%)
۱/۲	۴۲۸۵/۲۲	۴۳۴۱/۰۳	میزان تخریب اگزرژی (KW)
۲/۹	۲۹/۴۹	۲۸/۶۵	نرخ هزینه (\$/h)

در شکل ۳ نمودار تغییرات دمای هاضم و میزان گاز تولیدی هاضم با توجه به اطلاعات تجربی هاضم‌ها بر حسب مقدار لجن ورودی به سیستم در دماهای مختلف نشان

جدول ۲- معادلات هزینه اجزای سیستم

تجهیز	تابع هزینه	مرجع
هاضم	$Z_{dig}^{Cl} = 1.6049 \times \chi^{(0.5099)}$ (Millions \$) x is the total solid waste in thousand ton per year	[18]
موتور	$Z = \left(\frac{1536\ m}{0.92 - \eta_T}\right) \ln\left(\frac{P_i}{P_e}\right) (1 + \exp(0.036T_i - 54.4))$	[19]
مبادله کن گرمایی	$Z = 130\left(\frac{A_{HX}}{0.093}\right)^{0.78}$	[14]
پمپ	$Z = 3540W_p^{0.71}$	[14]
سولفورزدایی	$Z = 12 \times \dot{m}_{H2S} \times N \times 3600$	[20]
مخزن گاز	$757612.5 \times \left(\frac{V}{3000}\right)^{0.8}$	[21]
بلوئر	$Z = \left(\frac{75\ m}{0.9 - \eta_C}\right) \left(\frac{P_e}{P_i}\right) \ln\left(\frac{P_e}{P_i}\right)$	[20,21]

حاصل از تولید توان و گرما می باشد که رابطه زیر به دست می آید:

$$ANCF = R_{el} + R_h - (\dot{C}_f + \dot{Z}_{overall}^{OM}) \quad (7)$$

در این پژوهش، دوره بازگشت سرمایه با دو فرض محاسبه شده است. زمانی که گرما و توان تولیدی سیستم به فروش می رسد (PB1) و زمانی که تنها توان تولیدی سیستم به فروش می رسد (PB2).

فاکتور اگزژی اقتصادی هر یک از اجزای سیستم به صورت زیر تعریف می شود [۲۱]:

$$f_i = \frac{\dot{Z}_i}{\dot{Z}_i + \dot{C}_{D,i} + \dot{C}_{L,i}} \quad (8)$$

که در این رابطه $\dot{C}_{D,i}$ ، هزینه تخریب اگزژی و $\dot{C}_{L,i}$ هزینه اگزژی اتلافی می باشد.

۳- نتایج

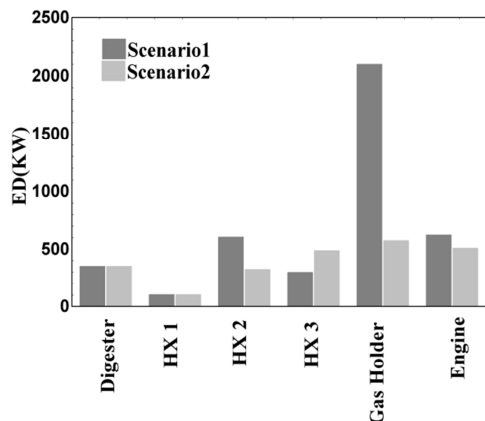
۳-۱- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی کد نوشته شده، نتایج کار حاضر با نتایج کار اوزدیل و همکاران [۵]، که مربوط به واحد تولید توان یک تصفیه خانه فاضلاب در ترکیه با موتور احتراق داخلی می باشد، مقایسه گردیده است. برای این منظور به کد نوشته شده شرایط ورودی مقاله اوزدیل و همکاران اعمال شده و همچنین میزان گرمای ناشی از روغن روانکاری نیز در نظر گرفته شده است. نتایج این مقایسه برای بازده اگزژی، میزان تخریب اگزژی و نرخ هزینه سیستم در جدول ۴ نشان داده شده است و همان طور که مشاهده می گردد، نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار است.

۳-۲- بررسی مقدار گاز تولیدی در هاضم و تثبیت دمای آن

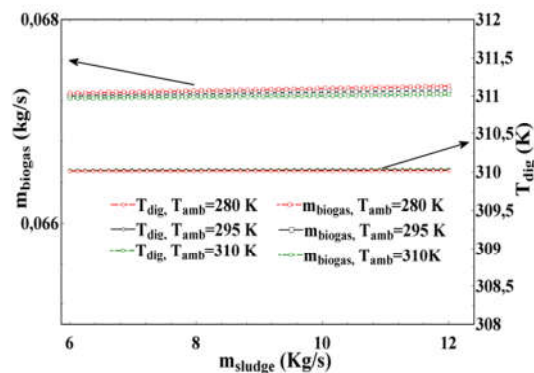
همان طور که در قسمت های قبلی اشاره شد برای اینکه هاضم عملکرد مناسبی در تولید گاز داشته باشد بایستی دمای آن در حدود ۳۷ درجه سلسیوس تثبیت شود و برای این منظور دمای لجن ورودی به هاضم باید در مبادله کن گرمایی کنترل گردد.

۵۷۶،۴ کیلووات کاهش خواهد داشت. تخریب انرژی موتور نیز در حالت اول برابر ۶۲۵ کیلووات و در حالت دوم برابر ۵۱۱ کیلووات



شکل ۴- میزان تخریب انرژی اجزای سیستم برای حالت اول و دوم

خواهد بود که این کاهش به دلیل استفاده از گرمای دو موتور در حالت دوم به جای یک موتور در حالت اول خواهد بود. در مبادله کن‌های گرمایی، در حالت ۲ تخریب انرژی مبادله کن گرمایی شماره ۱ که مربوط به گرمایش لجن ورودی به هاضم است، تغییر نمی‌کند ولی تخریب انرژی مبادله کن ۲ کاهش و مبادله کن ۳ افزایش می‌یابد که دلیل این امر تغییر در مقادیر گرمایی است که توسط دو موتور به آن‌ها تزریق می‌شود. سهم تخریب انرژی هر یک از اجزا برای دو حالت در شکل‌های ۵الف و ب نشان داده شده است. در هر دو حالت مخزن ذخیره گاز بیشترین میزان تخریب انرژی را داراست. پس از آن موتور تولید همزمان بیشترین میزان تخریب انرژی را داراست. نکته جالب توجه اینجاست که در حالت ۲ سهم تخریب انرژی مبادله کن گرمایی ۳ به میزان قابل توجهی افزایش داشته است. در شکل ۶ میزان نرخ هزینه اجزای و همچنین کل سیستم نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش تعداد موتورهای در حال کار نرخ هزینه کل سیستم از ۱۰۰ دلار بر ساعت به ۱۱۷/۷ دلار در ساعت می‌رسد که این هزینه مربوط به هزینه های تعمیر و نگهداری موتور می‌شود چون همان‌طور که واضح است تفاوت چندانی بین هزینه اولیه حالت ۱ و حالت ۲ وجود ندارد چرا که این دو حالت مربوط به حالت بهره برداری واحد تولید توان می‌شوند و تفاوتی در هزینه اولیه ایجاد نمی‌کنند و به همین دلیل نرخ هزینه سایر اجزای سیستم تقریباً ثابت است. در شکل ۷ میزان فاکتور اقتصادی انرژی تجهیزات نشان داده شده است، این فاکتور نسبت هزینه یک تجهیز به نرخ هزینه تخریب انرژی در آن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در این سیستم مبادله کن های گرمایی کمترین میزان f را دارند و این یعنی می‌توان در جهت اصلاح و بهبود آن‌ها اقدام کرد. بهترین تجهیزات که ضریب انرژی اقتصادی مناسبی دارند، پمپ های ۳ و ۴ هستند که با توجه به نمودارهای تخریب انرژی، سهم چندانی در تخریب انرژی سیستم ندارند. می‌توان تاثیر تغییر اجزای سیستم را با توجه به میزان تاثیر آن در بازده سیستم بررسی و با توجه به ارزش اقتصادی در مورد اصلاح یا عدم اصلاح آن تصمیم گرفت. برای این منظور نیاز به مطالعات



شکل ۳- تغییرات دمای هاضم و میزان گاز تولیدی برای مقادیر مختلف دبی لجن ورودی و در دماهای مختلف محیط

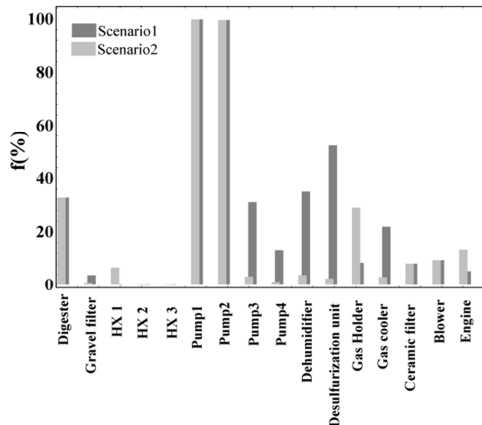
داده شده است. از مقایسه نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که دمای هاضم با توجه به عملکرد مبادله کن‌های گرمایی از دمای محیط مستقل است و ثابت نگه داشته می‌شود. همچنین می‌توان به این نتیجه رسید که مقدار لجن ورودی (در محدوده طراحی) و دمای محیط در عملکرد هاضم و میزان تولید بیوگاز خیلی تاثیرگذار نیستند به شرطی که با طراحی مناسب مبادله کن گرمایی دمای هاضم را در محدوده مناسب تثبیت کرد تا فرآیند بیولوژیکی تولید بیوگاز به خوبی اتفاق بیفتد. با توجه به داده های تجربی هاضم های واحد ۵ و ۶ تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران، میزان بیوگاز تولیدی هر هاضم در دمای ۳۷ درجه سلسیوس به طور متوسط در حدود ۰/۰۶۷ کیلوگرم بر ثانیه است. این موضوع اهمیت تثبیت دمای هاضم در محدوده مورد نظر با استفاده از مبادله کن‌های گرمایی را نشان داده و واقعی بودن فرضیه ۲ (فرضیات مدل سازی) را تأیید می‌کند.

۳-۳- نتایج بررسی انرژی اقتصادی سیستم

برای مقایسه بهتر، نتایج بررسی انرژی اقتصادی سیستم و تاثیر حالت بهره‌برداری در عملکرد سیستم، دو حالت در نظر گرفته شده و در هر دو حالت، میزان تخریب انرژی، انرژی تلف شده، نرخ هزینه و فاکتور انرژی- اقتصادی تجهیزات محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به اینکه ارزش تقریبی به دست آمده از معادلات جدول ۲ با هزینه واقعی انجام شده در تصفیه خانه مطابقت داشته است. ارزش زمانی در معادلات اقتصادی منظور نشده است.

در حالت شماره ۱ فقط یکی از موتورهای سیستم در مدار بهره برداری می‌باشد. و در حالت شماره ۲ هر دو موتور در مدار بهره برداری هستند. ولی میزان تولید گاز در هر دو حالت برابر ۰/۰۶۷ * ۳ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ میزان تخریب انرژی اجزای تاثیرگذار سیستم برای حالت ۱ و ۲ نشان داده شده است. به دلیل سهولت در نمایش از نمایش تخریب انرژی اجزای دیگر که مقادیر قابل توجهی نداشتند صرف نظر شده است. در این شکل‌ها HX نماد مبادله کن گرمایی می‌باشد. در حالت ۱ مخزن ذخیره گاز بیشترین میزان تخریب انرژی را داراست چرا که میزان قابل توجهی از بیوگاز تولیدی در سیستم چون قابلیت سوزانده شدن توسط موتور را ندارد فلز خواهد شد. اما در حالت شماره دو این مقدار از ۲۱۰۰ کیلووات به

هزینه و دوره بازگشت سرمایه برای کل سیستم و همچنین چرخه تولید توان رسم و با هم مقایسه شده اند. در شکل ۸ تغییرات توان الکتریکی تولیدی (Wel)، توان خالص (Wnet) چرخه تولید توان و گرما و همچنین سیستم تولید بیوگاز و چرخه نشان داده شده است. همواره توان خالص چرخه و سیستم با دبی گاز افزایش می‌یابد. در صورت در



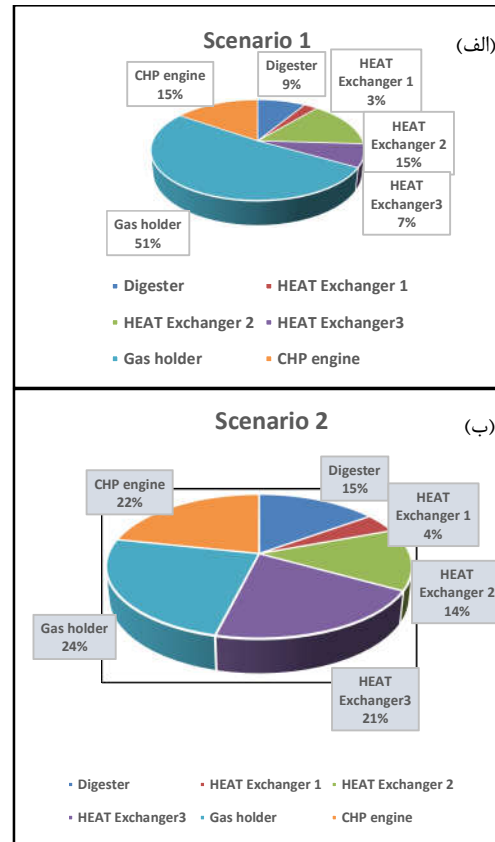
شکل ۷- فاکتور انرژی اقتصادی اجزای سیستم برای حالت ۱ و ۲

نظر گرفتن بخش تولید گاز و توان به صورت سیستم مشاهده می‌شود که توان خالص تولیدی کاهش می‌یابد و این به علت تامین مصرف انرژی الکتریکی تجهیزات با توان الکتریکی تولیدی موتور است. همچنین بازه تغییرات دبی گاز مصرفی در حالت ۲ افزایش و در نتیجه میزان توان نیز در این حالت افزایش خواهد داشت.

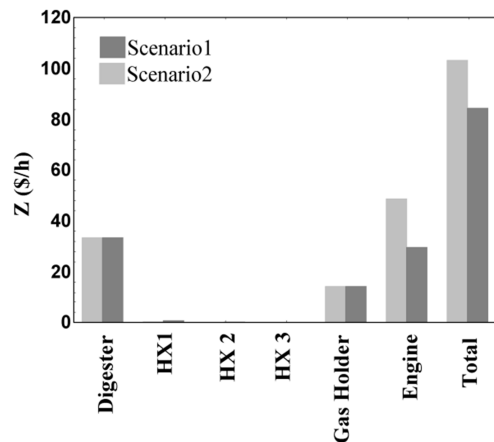
در شکل ۹ تغییرات بازه انرژی و انرژی چرخه و سیستم بر حسب دبی گاز مصرفی در دو حالت بهره برداری نشان داده شده است. با افزایش دبی گاز مصرفی بازه چرخه کاهش و بازه سیستم افزایش می‌یابد. علت این امر آن است که با افزایش دبی گاز مصرفی m_6 میزان انرژی ورودی به چرخه افزایش می‌یابد و چون موتور در دبی‌های بالاتر قابلیت تبدیل همه انرژی به توان الکتریکی را ندارد، بازه کاهش می‌یابد ولی در تعریف بازه سیستم انرژی ورودی بر مبنای دبی لجن ورودی به سیستم (m_6) در نظر گرفته می‌شود و مقدار آن با تغییر گاز ورودی به سیستم تغییر نمی‌کند، لذا با افزایش توان تولیدی بازه سیستم هم افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر این است که در حالت ۲، بازه انرژی و انرژی از حالت بهره برداری حالت ۱ کمتر است و علت آن درگیر شدن تجهیزات جانبی بیشتر است که سبب مصرف انرژی بیشتر می‌شود.

در شکل ۱۰ نمودار تغییرات تابع نرخ هزینه کل سیستم بر حسب دبی گاز مصرفی نشان داده شده است. همانطور که واضح است با افزایش

بیشتر می‌باشد که می‌توان در پژوهش‌های آینده به این موضوع پرداخت و با استفاده از روش‌های مختلف آن را مطالعه نمود.



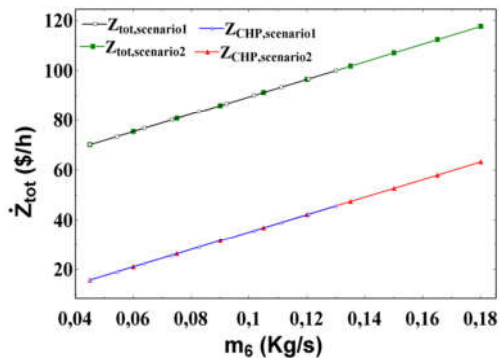
شکل ۵- درصد تخریب انرژی اجزای سیستم (الف) حالت ۱ (ب) حالت ۲



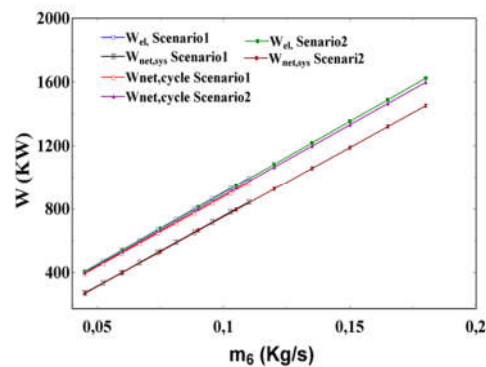
شکل ۶- میزان نرخ هزینه اجزا و کل سیستم برای حالت ۱ و ۲

۴-۳- نتایج مطالعات پارامتری

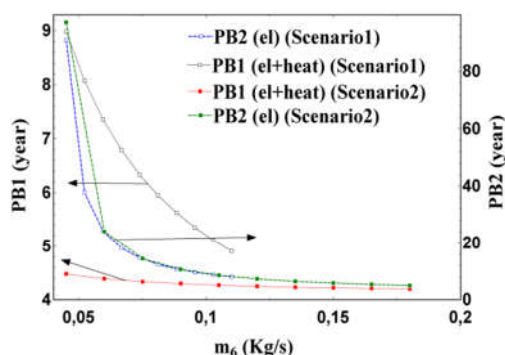
برای بررسی تاثیر تغییر هر یک از پارامترها در عملکرد سیستم، دبی گاز ورودی به موتور، m_6 به عنوان متغیر مستقل تعریف شده و تغییرات توان الکتریکی، بازه قانون اول و دوم ترمودینامیک، نرخ



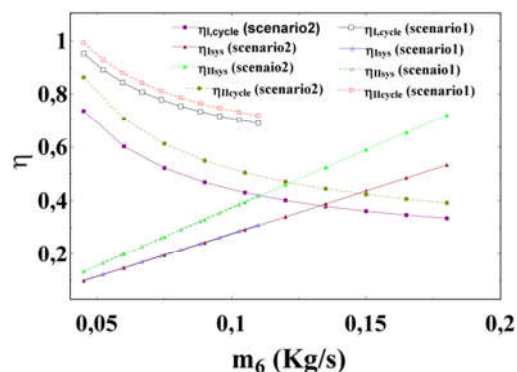
شکل ۱۰- تغییرات نرخ هزینه چرخه و سیستم در حالت اول و دوم بر حسب دبی گاز مصرفی موتور



شکل ۸- تغییرات توان الکتریکی تولیدی و توان خالص چرخه و سیستم در حالت اول و دوم بر حسب دبی گاز مصرفی موتور



شکل ۱۱- تغییرات بازگشت سرمایه سیستم در حالت اول و دوم بر حسب دبی گاز مصرفی موتور



شکل ۹- تغییرات بازده قانون اول و دوم چرخه و سیستم در حالت اول و دوم بر حسب دبی گاز مصرفی موتور

جدول ۵- نتایج برای دو حالت بهره برداری سیستم

پارامتر	حالت اول	حالت دوم
تعداد هاضم در حال بهره برداری	۳	۳
تعداد موتور در حال بهره برداری	۱	۲
بازده قانون اول سیستم (%)	۲۵	۵۳
بازده قانون دوم سیستم (%)	۳۸	۷۲
بازده قانون اول چرخه (%)	۷۲	۳۵
بازده قانون دوم چرخه (%)	۷۶	۴۲
توان تولیدی (KW)	۹۷۳	۱۶۲۵
توان خالص چرخه (KW)	۹۲۷	۱۴۵۲
توان خالص سیستم (KW)	۷۸۵	۱۵۹۹
نرخ هزینه سیستم (\$/h)	۱۰۰/۳	۱۱۷/۷
نرخ هزینه چرخه (\$/h)	۴۵/۷۳	۶۳/۳۲

دبی گاز مصرفی نرخ هزینه سیستم از حدود ۶۵ دلار در ساعت تا ۱۲۰ دلار در ساعت افزایش می‌یابد که این موضوع اهمیت بهره برداری درست را در سیستم خاطر نشان می‌کند به این معنا که بهره برداری درست می‌تواند تا ۵۰ درصد هزینه های سیستم را کاهش دهد که این موضوع سبب کاهش توان تولیدی نیز می‌شود. همچنین نمودار تغییرات هزینه موتورها نیز نشان می‌دهد که با افزایش دبی گاز مصرفی، نرخ هزینه موتورها از حدود ۱۷ دلار در ساعت تا ۶۰ دلار در ساعت افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱ تغییرات دوره بازگشت سرمایه سیستم بر حسب دبی گاز ورودی رسم شده است. برای این منظور دو حالت کسب درآمد فقط از طریق فروش توان الکتریکی (PB1) و کسب درآمد از فروش توان و گرما (PB2) در نظر گرفته شده است. PB1 در حالت ۲ برابر حدود ۴ سال است که با مقدار PB2 اختلاف ناچیز دارد. در حالت ۱ دوره بازگشت سرمایه PB2 حدود ۶/۷ سال و برای PB1 حدود ۴/۵ سال است و از آن نتیجه می‌گیریم که در صورت فروش گرمای سیستم یا استفاده از گرمای آن می‌توان دوره بازگشت سرمایه را کاهش داد. همه این مقادیر به دبی جرمی گاز ورودی به چرخه بستگی دارد، یعنی بازگشت سرمایه نیز به شرایط بهره برداری سیستم بستگی دارد. در حالت کلی با افزایش دبی جرمی دوره بازگشت سرمایه با افزایش دبی گاز ورودی به سیستم به شدت کاهش می‌یابد. در جدول ۵ نتایج مربوط به دو حالت در حداکثر دبی گاز مصرفی موتورها، دبی لجن

دوره بازگشت سرمایه ۱ (سال)	۴/۵	۴/۲
دوره بازگشت سرمایه ۲ (سال)	۶/۷	۶
میزان گاز مصرفی (kg/s)	۰/۱۳۴	۰/۱۸

- در حالت بهره برداری حالت ۲ نرخ هزینه کل سیستم از ۱۰۰ دلار در ساعت در حالت ۱ به ۱۱۷/۷ دلار در ساعت می‌رسد. در حالی که توان تولیدی سیستم در این حالت از ۹۲۳ کیلووات به ۱۴۵۰ کیلووات می‌رسد. برای تصمیم‌گیری بهتر باید بررسی شود که آیا این افزایش توان با این هزینه برای تولید توان الکتریکی به صرفه است یا خیر؟ که یک تصمیم مدیریتی خواهد بود.
- از نتایج فاکتور انرژی اقتصادی برای اجزای سیستم مشخص گردید که اجزای سیستم نیاز به بازنگری اساسی دارند. مخصوصاً مبادله‌کن‌های گرمایی سیستم می‌توانند با کمی هزینه بیشتر بازده بالاتری برای سیستم به دست دهند و یا حتی از گرمای اضافی که با انتخاب بهینه مبادله‌کن‌ها حاصل می‌شود برای کاربردهای دیگر در تصفیه‌خانه استفاده کرد.
- با بررسی بازده کل سیستم و بازده چرخه تولید توان و گرما مشخص گردید که بازده چرخه در حالت ۱ حدود ۷۲ درصد و بازده سیستم در حدود ۲۵ درصد است. در حالت ۲ بازده چرخه و سیستم به ترتیب برابر با ۳۵ و ۵۳ درصد است. انتخاب حالت بهینه بازده سیستم و چرخه نیز می‌تواند به بهره‌برداری بهتر این واحد کمک نماید.
- دوره بازگشت سرمایه با فروش توان تولیدی سیستم برای حالت ۱ برابر ۶/۷ سال و در حالت ۲ برابر ۶ سال خواهد بود. در حالی که اگر با فروش توان و گرما سیستم را بررسی کنیم بازگشت سرمایه در حالت ۱ برابر ۴/۵ سال و در حالت ۲ برابر ۴/۲ سال خواهد بود. پس توجه به حالت بهره‌برداری می‌تواند در محاسبات اقتصادی و دوره بازگشت سرمایه یک طرح تاثیرگذار باشد. و علاوه بر انجام اقداماتی از قبیل انتخاب مناسب مبادله‌کن‌های گرمایی یا سایر تجهیزات، می‌توان با بهره‌برداری مناسب نیز دوره بازگشت سرمایه را تا حدودی کاهش داد.

هرکدام از نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌تواند رهگشای یک پژوهش جدید در زمینه بهره‌برداری و یا طراحی بهینه سیستم‌های تولید توان و گرما در تصفیه‌خانه فاضلاب باشد.

۵- نمادها

T	دما (K)
h	بازده
p	فشار (Pa)
ex	انرژی ویژه (KJ/Kg)
Ex	نرخ انرژی (KW)
ED	نرخ تخریب انرژی (KW)
c	قیمت بر واحد انرژی (\$/GJ)
\dot{C}	نرخ قیمت (\$/h)
Z	هزینه سرمایه‌گذاری (\$)
\dot{Z}	نرخ سرمایه‌گذاری (\$/h)
\dot{W}	توان (KW)
V	حجم (m ³)

یکسان ورودی به هاضم‌ها و در دمای محیط یکسان با هم مقایسه شده است. نتیجه این مقایسه نشان می‌دهد که با بهره‌برداری ۲ موتور CHP به صورت همزمان می‌توان، توان خالص تولیدی سیستم را در حدود ۸۱۴ کیلووات افزایش داد که این موضوع سبب افزایش بازده قانون اول سیستم در حدود ۲۸ درصد خواهد شد در حالی که سبب افزایش حدود ۱۷ درصدی هزینه سیستم و افزایش دوره بازگشت سرمایه سیستم را در حالت استفاده از گرما حدود ۴ ماه و در حالت فروش فقط توان الکتریکی حدود ۸ ماه موجب می‌شود. به نظر می‌رسد این ساده‌ترین راه برای استفاده از هزینه انجام شده جهت بهره‌برداری بهینه می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مدل‌سازی و تحلیل انرژی و انرژی اقتصادی سیستم تولید بیوگاز و چرخه تولید همزمان توان و گرما در واحد ۶۵ تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران پرداخته شد. برای این منظور دو حالت بهره‌برداری مورد بررسی قرار گرفت که در حالت ۱ فقط یکی از موتورهای تولید همزمان در مورد بهره‌برداری قرار داشت و در حالت ۲ هر دو موتور در مدار بهره‌برداری قرار داشتند. ابتدا معادلات انرژی و اقتصادی اجزای سیستم با استفاده از قوانین ترمودینامیکی استخراج گردید و با استفاده از نرم‌افزار EES مدل‌سازی شد. مدل‌سازی انجام شده با مرجع [۶] اعتبارسنجی و مشاهده گردید که نتایج این مدل از دقت کافی برخوردار است. سپس پایداری تولید گاز و دمای هاضم نسبت به دبی لجن ورودی

به هاضم نشان داده شد. نتایج مهم این پژوهش به شرح زیر است:

- در بهره‌برداری با حالت ۱ بیشترین تخریب انرژی در مخزن ذخیره‌گاز اتفاق می‌افتد، پس بهتر است برای استفاده بهتر از انرژی گاز تولید شده از ذخیره‌گاز در مخزن، که در نهایت مجبور به فلر کردن آن خواهیم شد، خودداری کنیم. یعنی همیشه با توجه به حجم گاز تولیدی موتور آماده به کار داشته باشیم. پس از مخزن گاز، موتور بیشترین تخریب انرژی را داراست که برای جبران آن می‌توان روش‌های دیگر تولید گرما و توان در چرخه را بررسی کرد. تخریب انرژی در مبادله‌کن گرمایی ۳ هم قابل توجه است، یعنی شاید بتوان با بازطراحی این مبادله‌کن به افزایش بهره‌وری سیستم کمک کرد.
- بیشترین نرخ هزینه در سیستم به ترتیب مربوط به موتور، هاضم و مخزن ذخیره‌گاز می‌باشد که بعد از طراحی و ساخت سیستم عملاً غیرقابل تغییر هستند پس در مرحله طراحی لازم است که دقت بیشتری در انتخاب و ساخت این تجهیزات صورت پذیرد.

combined heat and power system in a municipal wastewater treatment plant. *Energy Reports*. 2022;8:9724-41.

[12] Tabriz ZH, Mohammadpourfard M, Akkurt GG, Heris SZ. Energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental (E) analysis of a new bio-waste driven multigeneration system for power, heating, hydrogen, and freshwater production: Modeling and a case study in Izmir. *Energy Conversion and Management*. 2023;288:117130.

[13] Asgari N, Saray RK, Mirmasoumi S. Seasonal exergoeconomic assessment and optimization of a dual-fuel trigeneration system of power, cooling, heating, and domestic hot water, proposed for Tabriz, Iran. *Renewable Energy*. 2023;206:192-213.

[14] Baghernejad A, Yaghoubi M. Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm. *Energy conversion and Management*. 2011;52(5):2193-203.

[15] Yari M, Mehr AS, Mahmoudi SMS, Santarelli M. A comparative study of two SOFC based cogeneration systems fed by municipal solid waste by means of either the gasifier or digester. *Energy*. 2016;114:586-602.

[16] Yunus AC, Michael AB. THERMODYNAMICS: AN ENGINEERING APPROACH: McGraw-Hill; 2002.

[17] Ozdemir K, Hepbasli A, Eskin N. Exergoeconomic analysis of a fluidized-bed coal combustor (FBCC) steam power plant. *Applied Thermal Engineering*. 2010;30(13):1621-31.

[18] Khaljani M, Saray RK, Bahlouli K. Comprehensive analysis of energy, exergy and exergo-economic of cogeneration of heat and power in a combined gas turbine and organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management*. 2015;97:154-65.

[19] Shokati N, Mohammadkhani F, Yari M, Mahmoudi SM, Rosen MA. A comparative exergoeconomic analysis of waste heat recovery from a gas turbine-modular helium reactor via organic Rankine cycles. *Sustainability*. 2014;6(5):2474-89.

[20] Mirmasoumi S, Ebrahimi S, Saray RK. Enhancement of biogas production from sewage sludge in a wastewater treatment plant: Evaluation of pretreatment techniques and co-digestion under mesophilic and thermophilic conditions. *Energy*. 2018;157:707-17.

[21] Mirmasoumi S, Saray RK, Ebrahimi S. Evaluation of thermal pretreatment and digestion temperature rise in a biogas fueled combined cooling, heat, and power system using exergoeconomic analysis. *Energy Conversion and Management*. 2018;163:219-38.

دوره بازگشت سرمایه (year)	PB
دبی جرمی (Kg/s)	m
فاکتور اثررزی اقتصادی	f
زیرنویس	
لجن فاضلاب	SS
قانون اول ترمودینامیک	I
قانون دوم ترمودینامیک	II
خالص	net
چرخه	Cycle
سیستم	Sys
هاضم	dig
سولفورزدایی	Ds
بالانویس	
کل	Total
شیمیایی	CH
فیزیکی	PH

۶- مراجع

[1] Basu P. Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory: Academic press; 2010.

[2] Aino S. Comparison of gasification, pyrolysis and combustion. *Intro to biorefineries biofuels*. 2013.

[3] Barber W, MCIWEM M, WEM C, editors. Factors influencing energy generation from municipal sludge digestion. 15th European Biosolids and Organic Resources Conference (Leeds: Aqua Enviro Technology Transfer); 2010.

[4] Brizi F, Silveira JL, Desideri U, dos Reis JA, Tuna CE, de Queiroz Lamas W. Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;38:193-211.

[5] Ozdil NFT, Tantekin A. Exergy and exergoeconomic assessments of an electricity production system in a running wastewater treatment plant. *Renewable energy*. 2016;97:390-8.

[6] Safari F, Dincer I. Development and analysis of a novel biomass-based integrated system for multigeneration with hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44(7):3511-26.

[7] Di Fraia S, Macaluso A, Massarotti N, Vanoli L. Energy, exergy and economic analysis of a novel geothermal energy system for wastewater and sludge treatment. *Energy conversion and management*. 2019;195:533-47.

[۸] صابری مهر ع، ادیبی ت، توحید. امکان سنجی ایجاد یک نیروگاه تولید همزمان برق و حرارت با سوخت بیوگاز بوسیله پیل سوختی اکسید جامد و سیستم خورشیدی در تصفیه خانه پساب شهری تبریز. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۲۰۲۱؛۲۵۱(۲):۱۰۳-۱۲.

[9] Campello LD, Barros RM, Tiago Filho GL, dos Santos IFS. Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy. *Environment, Development and Sustainability*. 2021;23:2614-29.

[10] Farahbakhsh MT, Chahartaghi M. Performance analysis and economic assessment of a combined cooling heating and power (CCHP) system in wastewater treatment plants (WWTPs). *Energy conversion and management*. 2020;224:113351.

[11] Sanaye S, Yazdani M. Energy, exergy, economic and environmental analysis of a running integrated anaerobic digester-