

# امکان سنجی ایجاد یک نیروگاه تولید همزمان برق و گرما با سوخت زیست‌گاز بوسیله پیل سوختی اکسید جامد و سیستم خورشیدی در تصفیه‌خانه پساب شهری تبریز

علی صابری مهر\*  
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب، ایران، a.s.mehr@bonabu.ac.ir  
توحید ادیبی  
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب، ایران، tohidadibi@yahoo.com

## چکیده

هدف این تحقیق تحلیل انرژی یک چرخه نیروگاهی تولید برق و گرما توسط پیل سوختی اکسید جامد با سوخت زیست‌گاز تولید شده در یک تصفیه‌خانه پساب شهری و سیستم خورشیدی است. تولید همزمان گزینه‌ای مورد اعتماد و به صرفه برای تصفیه‌خانه‌های پساب شهری مجهز به هاضم‌های بی‌هوازی است. زیست‌گاز تولید شده در پساب شهری می‌تواند به عنوان سوخت در یک نیروگاه تولید همزمان برای تولید برق و گرمای مفید با استفاده از محرک‌های اصلی مختلف استفاده شود. گرمای تولید شده توسط نیروگاه تولید همزمان می‌تواند برای تامین بخشی از گرمای فرایند هضم بی‌هوازی در هاضم تصفیه‌خانه پساب به کار رود. در این تحقیق یک مدل حالت پایا برای شبیه‌سازی پیل سوختی و سیستم ترکیبی نیروگاه ایجاد شده است. تصفیه‌خانه پساب شهری تبریز در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. سه واحد پیل سوختی اکسید جامد در حالت تولید همزمان ۱۸۰ کیلووات برق و ۱۲۵ کیلووات گرما تولید می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که تامین بخشی از گرمای مورد نیاز هاضم از طریق توان خورشیدی می‌تواند باعث صرفه جویی مقدار مصرف گاز طبیعی در این نیروگاه باشد. واژه‌های کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد، تولید همزمان، بازیافت گرما، تصفیه‌خانه تبریز، زیست‌گاز.

## Feasibility analysis of implementation of a Biogas Fed CHP power plant by means of a SOFC system and a solar system in a Waste Water Treatment Plant located in Tabriz

A. S. Mehr  
T. Adibi

Department of Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.  
Department of Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.

## Abstract

The purpose of the present research is to perform the energy analysis of a Combined Heat and Power (CHP) plant using a Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) system fed by biogas from a Waste Water Treatment Plant (WWTP) and a solar system. CHP is a reliable and cost-effective option for WWTPs where anaerobic digesters are equipped. Biogas produced in WWTPs can be utilized to fuel a CHP system to produce electricity and useful thermal energy using a variety of prime movers. The thermal energy produced by the CHP system can be used to meet a part of the anaerobic digestion process heat demand in the WWTP digester. In the present study, a steady-state model is developed for the fuel cell simulation and the integrated plant system. Tabriz WWTP is studied in this work. Three SOFC modules produce, in cogeneration mode, 180 kW electricity and 125 kW thermal energy. The results show that supplying a part of the digester heat demand through solar energy can save natural gas combustion in the plant.

**Keyword:** Solid Oxide Fuel Cell, CHP, Heat Recovery, Tabriz Wastewater Treatment Plant, Biogas.

شده و استفاده می‌شود، امروزه علاقه روز افزونی برای استحصال متان تشکیل شده در فرایند هضم بی‌هوازی<sup>۲</sup> به وجود آمده است. هضم بی‌هوازی یک فرایند زیستی است که در آن زیست توده‌های تجزیه شونده و مواد آلی موجود در پساب، فضولات دامی، پسماند خوراکی و زباله‌های شهری در غیاب اکسیژن تجزیه شده و به زیست‌گاز که حاوی متان، دی اکسید کربن و مقادیر اندکی از سایر گازهاست، تبدیل می‌شود. زیست‌گاز تولید شده در هضم بی‌هوازی یک ترکیب گاز سوختنی است که اگر به درستی از آن استفاده شود محصول با ارزشی است. زیست‌گاز تولید شده از پساب شهری به طور کلی از ۶۰ الی ۷۰ درصد حجمی متان، ۳۰ الی ۳۵ درصد حجمی دی اکسید کربن و ۶ الی ۱۵ درصد حجمی بخار آب تشکیل شده است و می‌تواند به عنوان سوخت در یک نیروگاه تولید همزمان با استفاده از محرک‌های متداولی مانند موتورهای احتراق داخلی، میکروتوربین‌ها و یا پیل‌های سوختی به

## ۱- مقدمه

تغییرات اقلیمی و افزایش آگاهی عمومی نسبت به مشکلات زیست محیطی همراه با پایان‌پذیری منابع اولیه انرژی نظیر نفت و گاز، محققان و سیاست‌گذاران را بر آن داشته است که به دنبال روش‌هایی برای تولید انرژی با راندمان بالا، منابع انرژی تجدیدپذیر و پایداری انرژی<sup>۱</sup> باشند. مطابق نقشه راه ۲۰۵۰، انرژی تجدیدپذیر سهم عمده‌ای در تولید انرژی در جهان خواهد داشت [۱]. سناریوهای کاهش کربن، افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر تا ۳۰ درصد را تا سال ۲۰۳۰ پیشنهاد می‌دهند. بنابراین سیستم‌های تولید با مقیاس کوچک مانند توربین‌های باد، سلول‌های خورشیدی، میکروتوربین‌ها و پیل‌های سوختی نقش و ظرفیت به‌سزایی را برای صرفه جویی در مصرف انرژی، کاهش گازهای گلخانه‌ای و تولید انرژی مطمئن ارائه می‌دهند. در حالی که میزان بسیاری از گاز متان در جهان به صورت گاز طبیعی استخراج

<sup>2</sup> Anaerobic Digestion

<sup>1</sup> Energy Sustainability

کار رود [۲]. برق تولیدی می‌تواند پاسخگوی بخش عمده و یا کل نیاز تصفیه‌خانه پساب شهری باشد و همچنین گرما بازیافت شده می‌تواند برای تامین بار گرمایی هاضم و یا گرمایش ساختمان‌های موجود در تصفیه‌خانه به کار رود. اما در حال حاضر زیست‌گاز تولید شده در اکثر تصفیه‌خانه‌ها بدون تولید برق صرفاً برای تامین گرمایش هاضم بی‌هوازی استفاده می‌شود و یا با توجه به این که گاز متان موجود در زیست‌گاز یک گاز گلخانه‌ای محسوب می‌شود و می‌تواند موجب پدیده گرمایش زمین شود، سوزانده (فلر) می‌شود [۳]. اکثر زیست‌گازها به دلیل دارا بودن مقادیر بالای دی اکسید کربن دارای ارزش گرمایی کمی می‌باشند که باعث کاهش جذابیت این گاز برای استفاده در موتورهای احتراق داخلی می‌شود. اما این گاز برای استفاده در پیل‌های سوختی می‌تواند مناسب باشد [۴].

پیل‌های سوختی به دلیل راندمان بالا و آلاینده‌گی کم جایگزین مناسبی برای سیستم‌های رایج تولید توان هستند. از میان انواع مختلف پیل‌های سوختی موجود، پیل‌های سوختی اکسید جامد و کربنات مذاب کاندیداهای اصلی برای به کارگیری در تصفیه‌خانه‌های پساب هستند. فناوری پیل سوختی کربنات مذاب در حال حاضر در نیروگاه‌های با مقیاس مگاوات به صورت تجاری در حال بهره برداری هستند [۵]. در حالی که پیل‌های سوختی اکسید جامد کماکان در مراحل توسعه خود هستند و در آینده‌ای نزدیک می‌توانند برای استفاده تجاری و برای مدت طولانی به کار گرفته شوند [۶]. سیستم‌های تولید انرژی چندگانه بر پایه پیل سوختی توسط براور و همکاران [۸،۷] ارائه شده است. مبنای کار این محققین بررسی نیروگاه‌های پیل سوختی اکسید جامد با سوخت متان با قابلیت تولید همزمان برق، گرما و هیدروژن بوده است. علاوه بر تحقیقاتی که به سیستم‌های انرژی بر پایه پیل سوختی با سوخت متان پرداخته، مطالعات متعددی نیز در مورد استفاده از پیل‌های سوختی به عنوان محرک برای سیستم‌های تولید چندگانه در تصفیه‌خانه‌های پساب با چیدمان مختلف گزارش شده است. سانچز و همکاران [۹] یک سیستم انرژی تولید چندگانه بر پایه پیل سوختی کربنات مذاب و موتورهای احتراق داخلی در تصفیه‌خانه‌های پساب شهری ارائه داده است. در کار آنها پیل سوختی اکسید جامد در پایین دست یک موتور احتراق داخلی که توسط زیست‌گاز تولید شده در تصفیه‌خانه تغذیه می‌شود به کار رفته است. ترندویکز و براون [۱۰] یک تحلیل جامع تکنواکونومیکی در مورد سیستم‌های تولید همزمان برق و گرما بر پایه پیل سوختی برای استفاده از زیست‌گاز تولید شده در تصفیه‌خانه پساب شهری ارائه می‌دهند. بورللو و همکاران [۱۱] یک سیستم تولید همزمان بر پایه پیل سوختی اکسید جامد با سوخت تولید شده از هضم بی‌هوازی مواد آلی موجود در زباله‌های جامد شهری را مدلسازی و تحلیل کرده اند که در آن از متمرکزکننده توان خورشید<sup>۱</sup> و ذخیره کننده نیز استفاده شده بود. نتایج این کار نشان داد که استفاده از سیستم متمرکزکننده توان خورشید می‌تواند به صرفه جویی زیست‌گاز به مقدار ۷/۶۳ تن در سال (۴ درصد کل زیست‌گاز تولیدی) منجر شود که می‌تواند برای تولید برق به میزان ۱۳۱ گیگا ژول در سال در پیل سوختی‌های با سوخت

زیست‌گاز استفاده شود. آرسپاکوچاگا و همکاران [۱۲] یک سیستم پیل سوختی در مقیاس پایلوت و با ظرفیت ۲/۸ کیلوواتی با سوخت زیست‌گاز را در یک تصفیه‌خانه پساب به مدت ۴۰۰ ساعت به کار گرفته اند. پاپورللو و همکاران [۱۳] یک انباره پیل سوختی ۵۰۰ کیلوواتی را با استفاده از زیست‌گاز تولید شده از مواد پسماند آلی برای ۴۰۰ ساعت آزمایش کردند. همچنین به تازگی کاربرد پیل سوختی اکسید جامد در یک تصفیه‌خانه پساب شهری در سطح اثبات مفهوم<sup>۲</sup> در پروژه‌های موسوم به SOFCOM ارزیابی و نمایش داده شده است [۱۴]. این پروژه یک برنامه تحقیقاتی با حمایت اتحادیه اروپا بود که به مطالعه فنی و اقتصادی استفاده از پیل‌های سوختی اکسید جامد در تصفیه‌خانه پساب شهری بود. برای توضیحات بیشتر در مورد این پروژه به مرجع [۱۵] مراجعه شود.

همانگونه که در بالا اشاره شد نیروگاه‌های پیل‌های سوختی اکسید جامد در سالهای اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته اند. اما کارهای اندکی در مورد نحوه بازیافت گرمایی و انتگراسیون انرژی سیستم‌های پیل سوختی اکسید جامد در تصفیه‌خانه‌های پساب شهری صورت گرفته است. این مقاله چارچوبی را فراهم می‌آورد که در آن جزئیات بیشتری در مورد طراحی و بررسی عملکرد یک نیروگاه پیل سوختی در تصفیه‌خانه پساب شهر تبریز با تاکید و تمرکز بر روی انتگراسیون انرژی و بازیافت گرمایی نیروگاه ارائه می‌شود. همچنین امکان استفاده از انرژی گرمایی خورشیدی برای تامین بخشی از گرمای مورد نیاز فرایند هضم بی‌هوازی در تصفیه‌خانه‌های پساب شهری بررسی می‌شود. این مقاله با توضیحاتی مختصر در مورد تصفیه‌خانه پساب مرجع و طرح یک نیروگاه تولید همزمان بر پایه سه واحد پیل سوختی اکسید جامد با سوخت زیست‌گاز تولید شده در محل شروع می‌شود. سپس نحوه عملکرد سیستم انتگراسیون گرمایی نیروگاه شرح داده می‌شود. سیستم انتگراسیون انرژی نیروگاه ارائه شده شامل سه مبادله‌کن بازپای گرمایی است که گرما موجود در گازهای خروجی پیل‌های سوختی اکسید جامد را بازیابی می‌کند. گرما بازیافت شده توسط یک حلقه بسته واسط به هاضم بی‌هوازی منتقل می‌شود. یک بویلر برای مواقعی که گرمای بازیابی شده برای فرایند هضم بی‌هوازی کافی نیست به صورت موازی تعبیه شده است. همچنین تاثیر استفاده از متمرکز کننده توان خورشید و به طور ویژه تاثیر آن بر روی کاهش مصرف سوخت در نیروگاه مورد بحث قرار خواهد گرفت. همچنین عملکرد نیروگاه از نقطه نظر کاهش گازهای گلخانه‌ای تحلیل خواهد شد.

## ۲- توصیف سیستم

در شکل ۱ تصویر هوایی تصفیه‌خانه تبریز نشان داده شده است. همچنین محل پیشنهادی برای استقرار تجهیزات پیل سوختی و دریافت کننده‌های خورشیدی با علامت ستاره نشان داده شده است. تصفیه‌خانه‌های پساب تاسیساتی هستند که برای تصفیه و خالص سازی آب به کار می‌روند. فرایند های به کار رفته در تصفیه‌خانه ها به طور کلی شامل موارد تصفیه اولیه، حوضچه های ته نشینی اولیه، تصفیه ثانویه و ضد عفونی کردن است [۱۷].

<sup>2</sup> Proof of Concept

<sup>1</sup> Concentrated Solar Power System

✓ میانگین تولید زیست‌گاز در سال ۲۰۱۸ حدود ۶۳ متر مکعب بر ساعت بوده است.

همچنین نمونه‌گیری‌های متعدد انجام شده نشان می‌دهد که زیست‌گاز تولیدی این تصفیه‌خانه به طور متوسط دارای ۶۴ درصد حجمی متان است (جدول ۱). به علت تحمل کم پیل سوختی اکسید جامد نسبت به ناخالصی‌های موجود در سوخت مانند سیلوکسان‌ها و ترکیبات گوگرداری که در زیست‌گاز موجود هستند، استفاده از این تجهیزات پاکسازی برای زدودن ناخالصی‌ها اجتناب‌ناپذیر است. فرایند پاکسازی با جداسازی گوگرد کاهش یافته شروع می‌شود و سپس با جدا سازی رطوبت و استفاده از جاذب‌های کربن فعال برای زدودن سیلوکسانها و هالوکربن‌ها ادامه می‌یابد. قبل از ورود زیست‌گاز به پیل سوختی برای زدودن هالوکربن و ترکیبات گوگردی باقی مانده از فرایند هیدروپروسسینگ در دمای بالا<sup>۲</sup> استفاده می‌شود (۱۸). تولید همزمان گرینه‌ای مورد اعتماد و به صرفه برای تصفیه‌خانه‌های پساب شهری مجهز به هاضم‌های بی‌هوازی است. زیست‌گاز تولید شده در تصفیه‌خانه‌های پساب شهری می‌تواند به عنوان سوخت در یک نیروگاه تولید همزمان برای تولید برق و گرمای مفید با استفاده از محرک‌های اصلی مختلف استفاده شود. گرم کردن لجن و لای گرفته شده از پساب برای انجام فرایند هضم بی‌هوازی رایج‌ترین بهره‌گیری از گرمای تولیدی از محرک‌ها در داخل تصفیه‌خانه پساب شهری است. در این کار گرمای بازیافت شده از گازهای خروجی پیل سوختی اکسید جامد برای تامین بخشی از نیاز گرمای فرایند هضم بی‌هوازی استفاده می‌شود. با توجه به این که این گرما بازیابی شده نمی‌تواند تمام نیاز گرمای هاضم را برآورده کند، یک بویلر و همچنین یک سیستم متمرکزکننده توان خورشید به کار گرفته شده است.

جدول ۱- ترکیب زیست‌گاز تولیدی در تصفیه‌خانه تبریز [17]

ترکیب	واحد	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	۶#
متان	%	۶۵/۵	۶۴/۷	۶۳/۴	۶۳/۸	۶۳/۱	۶۴/۱
دی اکسید کربن	%	۳۲/۲	۳۰/۳۹	۳۰/۱۵	۳۱/۶	۳۳/۳	۳۵/۱
اکسیژن	%	۰/۳۳	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۰۲

مانند سایر محرک‌ها، پیل سوختی‌ها هم می‌توانند برای تولید همزمان مورد استفاده قرار گیرند. مدل برای ظرفیت ۶۰ کیلووات ایجاد شده است. در این مدل هوا پس از دمیده شدن توسط دمنده وارد مبادله‌کن گرمایی پیش گرمکن هوا می‌شود. سپس هوای گرم شده به سمت کاتد پیل سوختی فرستاده می‌شود. در سوی دیگر زیست‌گاز پاکسازی شده توسط دمنده دیگری دمیده شده و با گاز برگشتی از آند ترکیب می‌شود. سپس گاز ترکیب شده وارد پیش به‌ساز<sup>۳</sup> می‌شود. جایی که در بخشی از متان طی واکنش‌های به‌سازی<sup>۴</sup> و دگرگونی<sup>۵</sup> تبدیل به هیدروژن می‌شود. به‌ساز به صورت یک راکتور بی دررو مدلسازی شده است و دمای خروجی و تبدیل متان به هیدروژن وابسته



شکل ۱- تصویر هوایی تصفیه‌خانه تبریز

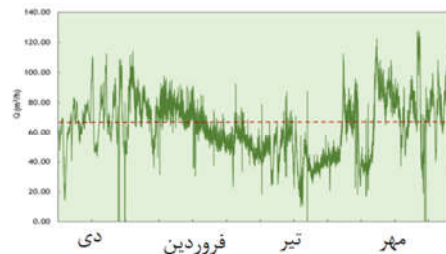
سیستم تصفیه‌خانه فاضلاب تبریز شامل دو مرحله اولیه و ثانویه تصفیه می‌باشد که در مرحله اول تصفیه فیزیکی و در مرحله بعدی تصفیه بیولوژیکی و در نهایت گند زدائی انجام می‌پذیرد. فرایند تصفیه بیولوژیکی فاضلاب از نوع لجن فعال (Activated Sludge) با هوا دهی دیفیوژری و تجهیزات هضم بی‌هوازی (Anaerobic Digestion) جهت تصفیه و تثبیت لجن تولیدی است. متوسط دبی سالیانه فاضلاب و طراحی تصفیه‌خانه به ترتیب ۱/۱۵ و ۱/۵ متر مکعب در ثانیه می‌باشد. همچنین حداکثر دبی لحظه‌ای در روزهای بارانی و غیر بارانی به ترتیب ۳/۸ و ۲/۵ متر مکعب در ثانیه و غلظت<sup>۱</sup> BOD و مواد معلق فاضلاب ورودی به ترتیب ۲۵۰ و ۳۵۰ میلی گرم در لیتر و بار آلودگی BOD و مواد معلق فاضلاب ورودی به ترتیب ۳۲۴۰۰ و ۴۵۳۶۰ کیلو گرم در روز می‌باشد. ضمناً کیفیت پساب خروجی از تصفیه‌خانه بر اساس معیارهای طراحی عبارتند از:

الف) غلظت BOD فاضلاب تصفیه شده خروجی کمتر از ۲۰ میلی گرم در لیتر

ب) غلظت مواد معلق فاضلاب تصفیه شده خروجی کمتر از ۳۰ میلی گرم در لیتر

ج) غلظت کلر باقی مانده فاضلاب خروجی کمتر از ۰/۵ میلی گرم در لیتر

مقدار زیست‌گاز تولید شده در تصفیه‌خانه تبریز برای سال ۲۰۱۸ در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- میزان زیست‌گاز تولید شده در سال ۲۰۱۸ [۱۷].

ویژگی‌های اصلی مشاهده شده در نمودارها عبارتند از:

- ✓ نوسان بسیار زیاد در زیست‌گاز تولیدی در طول سال
- ✓ کاهش تولید زیست‌گاز در فصل تابستان به علت ورود کمتر پساب به تصفیه‌خانه

<sup>2</sup> High Temperature Hydroprocessing

<sup>3</sup> Pre-reformer

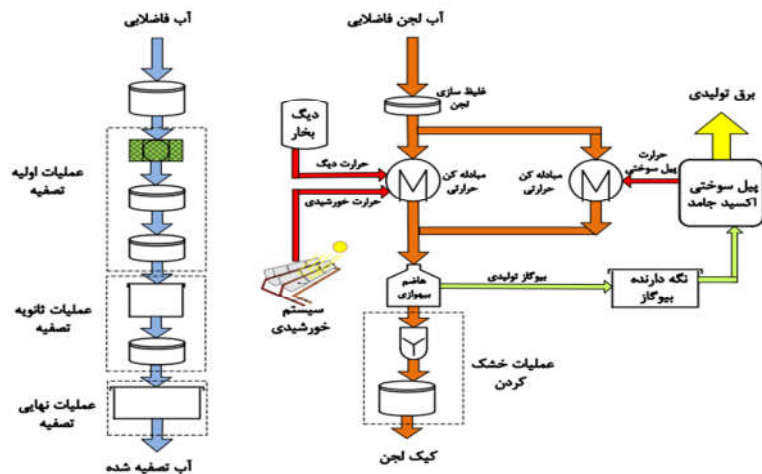
<sup>4</sup> Reforming

<sup>5</sup> Shifting

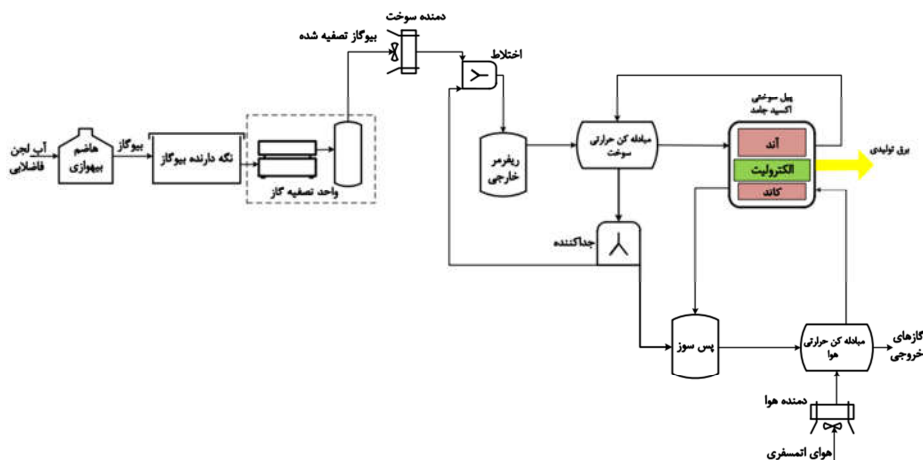
<sup>1</sup> Biological Oxygen Demand

گاز برگشتی از آند نیاز به استفاده از آب سختی گیری شده از خارج نباشد. مراحل توضیح داده شده در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. در شکل ۵ میزان توان برق مصرفی در تصفیه‌خانه نشان داده شده است. با توجه به اینکه هدف اصلی این مجموعه تصفیه آب است، توان برق بالایی برای این تجهیزات مصرف می‌شود که از نظر اقتصادی هزینه آن با مالیات پرداخت شده توسط شهروندان تامین می‌شود. به همین دلیل در تصفیه‌خانه‌ها انرژی مورد نیاز معمولاً بیشتر از ارزش انرژی زیست‌گاز تولید شده است، حتی اگر از سیستم‌های پیل‌سوختی با بازدهی بالا استفاده شود. به هر حال با استفاده از پیل سوختی اکسید جامد میزان تقریبی ۲۵ الی ۳۰ درصد از توان برق مصرفی در تصفیه‌خانه می‌تواند به طور مداوم توسط سیستم تولید همزمان تولید شود که باعث کاهش هزینه خرید برق مصرفی می‌شود. در تصفیه‌خانه شهر تبریز یک هاضم بی‌هوازی وجود دارد. شرایط عملیاتی درون هاضم نیازمند دمای ثابت ۳۵ درجه سلسیوس صرف نظر از شرایط جوی و تاثیر دمای خاک است. شرایط عملکردی گرمای هاضم در جدول ۲ نمایش داده شده است. همچنین مساحت سطوح مختلف هاضم در جدول ۳ آورده شده است.

به شرایط ورودی محاسبه شده اند. بنابراین هیچ گرمای خارجی برای این چیدمان نیاز نیست. پس از این گاز بهسازی شده به وسیله یک مبادله‌کن گرمای (مبادله‌کن گرمکن سوخت) پیش گرم شده و به سمت آند پیل سوختی فرستاده می‌شود. این سوخت-گاز سپس در یک فرآیند به سازی داخلی به یک سوخت غنی از هیدروژن تبدیل تا در واکنش الکتروشیمیایی درون انباره پیل سوختی شرکت کند. واکنش الکتروشیمیایی گرماده بوده و گرما تولید می‌کند. بخشی از این گرما برای بهسازی درونی استفاده می‌شود، بخش دیگری برای گرم کردن سل‌ها و واکنش گرما استفاده می‌شود و بقیه به محیط منتقل می‌شوند. در این فرآیند در کاند و آند با دمای با توان تولید می‌شود. یک اینترتر جریان مستقیم برق تولیدی توسط انباره را به برق با جریان متناوب برای شبکه تبدیل می‌کند. پس از اتمام فرآیند الکتروشیمیایی در پیل سوختی اکسید جامد، هوای اضافی موجود در گاز خروجی از کاند و بخشی از گاز خروجی از آند که داری مقداری سوخت واکنش نداده است در یک پس سوز به طور کامل سوزانده می‌شوند و بخشی از گاز خروجی از آند برای ترکیب با سوخت زیست‌گاز ورودی برگشت داده می‌شود. میزان بخار به کربن طوری تعریف می‌شود که با تنظیم مقدار



شکل ۳- شمای فرایند تصفیه آب و لجن فاضلابی به همراه نحوه تولید زیست‌گاز با کمک سیستم خورشیدی و پیل سوختی



شکل ۴- تصویر پیل سوختی مدل شده در این کار به همراه سیستم پاکسازی زیست‌گاز

### ۳- مدل سازی سیستم

در این بخش مدل سازی ترمودینامیکی سیستم ارائه شده است. در محاسبات از فرض های زیر استفاده شده است:

- هوای اتمسفری از ۷۹٪ نیتروژن و ۲۱٪ اکسیژن تشکیل شده است.
- گاز طبیعی حاوی ۱۰۰٪ متان فرض شده است.
- تحلیل در شرایط تعادل ترمودینامیکی و حالت پایا در نظر گرفته شده است.
- از تغییرات انرژی های جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده است.
- مبادله کن های گرمای عایق هستند و هیچ تبادل گرمای با محیط صورت نمی گیرد.
- گازهای نسوخته به طور کامل در پس سوز پیل سوختی اکسید جامد اکسید می شوند، همچنین گاز طبیعی در بویلر به طور کامل می سوزد.

داده های ورودی برای شبیه سازی سیستم در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴- داده های ورودی برای پیل سوختی و

اجزای نیروگاه [20]

سیستم پیل سوختی اکسید جامد	
سطح فعال	50 cm <sup>2</sup>
بازده اینورتر AC-DC	٪ ۹۷
فاکتور مصرف سوخت (FU)	٪ ۸۵
دمای پایه ورودی به پیل سوختی	۸۰۰ °C
تعداد سل	۵۵۰۰
نسبت بخار به کربن	۲/۵
مبادله کن های گرمای	
افت فشار	٪ ۲-۵
پمپ ها	
بازده اینترنروپیک	٪ ۹۰
متمرکز کننده توان خورشید	
اختلاف دما	۶۰ °C
سیال عامل	آب
شرایط محیط	
دمای محیط	۱۵ °C
فشار محیط	۳۲۵ kPa
اگرزوی شیمیایی استاندارد	
CH <sub>4</sub>	۸۳۱ kJ/mol
CO <sub>2</sub>	۲۰ kJ/mol
CO	۲۷۵ kJ/mol
N <sub>2</sub>	۱ kJ/mol
O <sub>2</sub>	۴ kJ/mol
H <sub>2</sub>	۲۳۶ kJ/mol
H <sub>2</sub> O (g)	۱۰ kJ/mol

پیل سوختی دارای سه بخش اصلی است: آند، کاتد و یک الکترولیت که در بین آند و کاتد قرار دارد. سوخت و هوا به ترتیب به آند و کاتد به وارد فرستاده می شوند، جایی که سوخت در یک فرایند الکتروشیمیایی اکسید شده و اکسیژن کاهش می یابد و باعث تولید جریان مستقیم در مدار خارجی می شود. واکنش های شیمیایی در سل ها به صورت روابط زیر هستند:



شکل ۵- میزان مصرف برق تصفیه خانه [17]

جدول ۲- داده های استفاده شده در مدل سازی و محاسبه

بار گرمای مورد نیاز

شرایط نامی	واحد	مقدار
دمای ورودی پساب	درجه سلسیوس	۱۵
دمای محیط	درجه سلسیوس	۲
دمای کف	درجه سلسیوس	۱۰
دبی حجمی پساب	متر مکعب بر ثانیه	۲۴۸
ضریب انتقال گرما از دیواره	وات بر متر مربع درجه سلسیوس	۰/۹
ضریب انتقال گرما از کف	وات بر متر مربع درجه سلسیوس	۲/۲۳
اتلاف در لوله ها	%	۱۰

جدول ۳- اطلاعات ساختاری هاضم بی هوازی برای محاسبه

بار گرمای

مساحت (متر مربع)	مقدار
دیوار بالاتر از زمین	۷۸۵/۴
دیوار پایین تر زمین	۱۲۵/۷
سطح عمودی گنبد	۱۲/۶
سطح سقف تخت گنبد	۳/۱
سطح مخروطی سقف بالا	۳۳۱
سطح مخروطی سقف پایین	۳۳۲
دیوار خارجی عایق شده	۱۱۲۳/۱
دیوار زیر زمین	۴۵۰

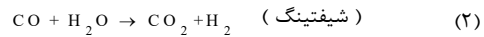
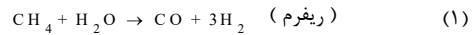
ایران از میانگین سالانه تابش خورشیدی بالایی برخوردار است. تمام کشور از امکان تولید انرژی خورشیدی برخوردار است. انرژی خورشیدی هیچ سرو صدا و آلاینده ای تولید نمی کند و گرمای تولید شده از آن می تواند در تصفیه خانه پساب شهری جهت تامین گرما لازم برای فرایند هضم بی هوازی و گرم کردن هاضم به کار رود. سیستم متمرکز کننده توان خورشید صفحات خورشیدی هستند که در آنها از آینه هایی برای بازتاب و متمرکز کردن اشعه خورشید بر روی یک سطح دریافت کننده استفاده می شود. این منعکس کننده ها می توانند نور خورشید را بر روی یک خط و یا به طور نقطه ای متمرکز کنند و سیال انتقال دهنده گرما را تا بیش از ۱۰۰ درجه سلسیوس گرم کنند.

و به شکل سهموی ساخته می‌شوند که به وسیله آن تابش خورشید به روی یک لوله دریافت کننده بازتابیده می‌شود. لوله دریافت کننده یک لوله فلزی سیاه رنگ است که در طول خط کانونی صفحه دریافت کننده قرار دارد و سیال انتقال دهنده گرما از داخل عبور می‌کند. همچنین برای کاهش اتلاف گرما یک لوله شیشه‌ای خلا شده به طور هم مرکز در اطراف لوله دریافت کننده قرار دارد. متمرکز کننده IND300 یک نوع کوچک و مناسب از خانواده متمرکز کننده‌ها است که برای سیستم ارائه شده انتخاب شده است. این متمرکز کننده می‌تواند سیال عامل را بین ۱۴۰ الی ۱۹۰ درجه سلسیوس گرم کند و راندمان آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

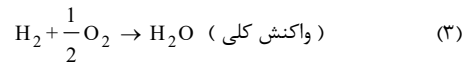
$$\eta_{IND300} = 0.733 - 0.238 \left( \frac{\bar{T}_{wf} - T_0}{G} \right) - 0.0013 \left( \frac{\bar{T}_{wf} - T_0}{G} \right)^2 \quad (4)$$

در حالی که  $\bar{T}_{wf}$  و  $G$  به ترتیب میانگین دمای سیال عامل و میزان تابش مستقیم خورشید است. میانگین تابش در تبریز در شکل ۶ نشان داده شده است. تعاریف بازده برای سیستم کلی تعریف شده اند.

در حالی که  $\dot{W}_{net}$  توان خالص خروجی (توان انباره منهای توان دمنده‌ها و پمپ‌ها) است. معادله پایستگی جرم و انرژی برای اجزای مختلف سیستم در آورده شده است.



معادله (۱) مربوط به واکنش بهسازی است که در آن گاز متان به هیدروژن و کربن مونوکسید تبدیل می‌شود. معادله (۲) واکنش دگرگونی را نمایش می‌دهد که در آن کربن مونوکسید تولید شده در واکنش بهسازی با بخار آب واکنش داده و هیدروژن بیشتری تولید می‌شود. سپس هیدروژن تولید شده از این واکنشها در واکنش الکتروشیمیایی زیر (۳) شرکت می‌کند:

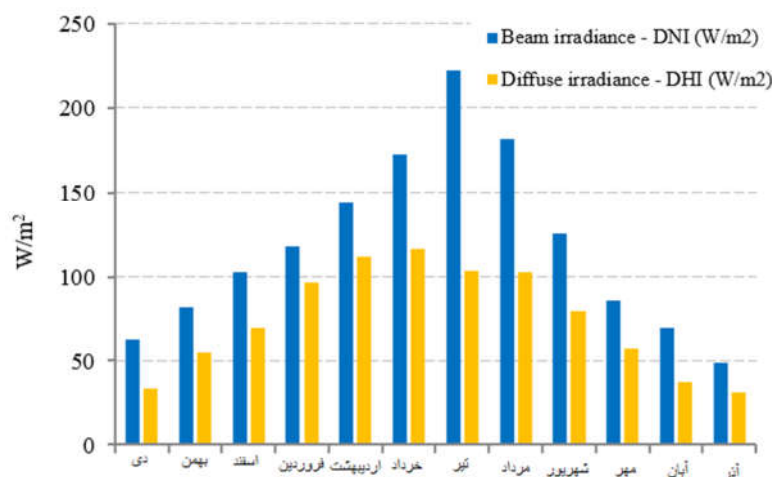


طراحی مکانیکی مبادله‌کن‌های گرمای به منظور محاسبه ضریب انتقال گرما و سطح مورد نیاز برای انتقال گرما در مبادله‌کن در نرم‌افزار ASPEN EDR انجام شده است. به منظور شبیه‌سازی سیستم کلی، مقدار گرما مورد نیاز هاضم که توسط شرکت آب و فاضلابی تبریز ارائه شده است به عنوان ورودی کل سیستم، همچنین زیست‌گاز تولیدی در محل تصفیه‌خانه و در کنار آن ورودی های لازم برای تولید ۶۰ کیلووات الکتریکی از پیل سوختی ورودی های کل سیستم لحاظ می شوند. با نوشتن موازنه جرم و انرژی برای اجزای سیستم و حل همزمان معادلات خروجی های مدنظر که به واقع میزان مساحت مورد نیاز سیستم خورشیدی، بازده کل سیستم و میزان گازطبیعی مصرفی به عنوان سوخت می‌باشند، محاسبه خواهد شد. جهت اختصار، مدل‌سازی الکتروشیمیایی با جزئیات بیشتر در ضمیمه (الف) آورده شده است. سیستم متمرکزکننده خورشیدی مورد استفاده از نوع خطی سهموی است. این نوع متمرکز کننده‌ها از ورق‌هایی با میزان بازتاب بالا

جدول ۵- معادله پایستگی جرم و انرژی برای قسمت‌های مختلف

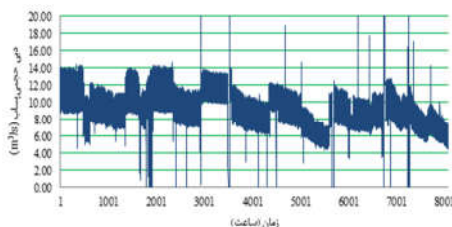
پایستگی انرژی	پایستگی جرم	قسمت
$\dot{W}_{Air, Blower} = \dot{n}_2 \bar{h}_2 - \dot{n}_1 \bar{h}_1$	$\dot{n}_1 = \dot{n}_{air}; \dot{n}_1 = \dot{n}_{N_2,1} + \dot{n}_{O_2,1}; \dot{n}_1 = \dot{n}_2$	دمنده هوا
$\dot{W}_{Fuel, Blower} = \dot{n}_5 \bar{h}_5 - (\dot{n}_{5a} \bar{h}_{5a} + \dot{n}_{5b} \bar{h}_{5b})$	$\dot{n}_5 = \dot{n}_{biogas} + \dot{n}_{NG}; \dot{n}_5 = \dot{n}_{CH_4,5} + \dot{n}_{CO_2,5}$	دمنده سوخت
$\dot{Q}_{AHX} = \dot{n}_3 \bar{h}_3 - \dot{n}_2 \bar{h}_2$ $\dot{Q}_{AHX} = \dot{n}_{13} \bar{h}_{13} - \dot{n}_{14} \bar{h}_{14}$	$\dot{n}_2 = \dot{n}_3; \dot{n}_3 = \dot{n}_4$ $\dot{n}_{13} = \dot{n}_{CO_2,13} + \dot{n}_{H_2O,13} + \dot{n}_{O_2,13} + \dot{n}_{N_2,13}$	پیش گرم کن هوا
$\dot{Q}_{FHX} = \dot{n}_8 \bar{h}_8 - \dot{n}_7 \bar{h}_7$ $\dot{Q}_{FHX} = \dot{n}_9 \bar{h}_9 - \dot{n}_{10} \bar{h}_{10}$	$\dot{n}_7 = \dot{n}_8; \dot{n}_9 = \dot{n}_{10}$ $\dot{n}_7 = \dot{n}_{CO,7} + \dot{n}_{CO_2,7} + \dot{n}_{H_2O,7} + \dot{n}_{H_2,7} + \dot{n}_{CH_4,7}$ $\dot{n}_9 = \dot{n}_{CO,9} + \dot{n}_{CO_2,9} + \dot{n}_{H_2O,9} + \dot{n}_{H_2,9} + \dot{n}_{CH_4,9}$	مبادله‌کن گرمایی سوخت
$\dot{n}_6 \bar{h}_6 + \dot{Q}_{PR} = \dot{n}_7 \bar{h}_7$	$\dot{n}_{CH_4,7} = \dot{n}_{CH_4,6} - p_r; \dot{n}_{H_2,7} = \dot{n}_{H_2,6} + 3p_r + q_r$ $\dot{n}_{H_2O,7} = \dot{n}_{H_2O,6} - p_r - q_r; \dot{n}_{CO,7} = \dot{n}_{CO,6} + p_r - q_r$ $\dot{n}_{CO_2,7} = \dot{n}_{CO_2,6} + q_r$ $\ln K_{s,PR} = -\frac{\Delta \bar{g}_{s,PR}^0}{RT_{PR}} = \ln \left[ \frac{(\dot{n}_{CO_2,7}) \times (\dot{n}_{H_2,7})}{(\dot{n}_{CO,7}) \times (\dot{n}_{H_2O,7})} \right]$	ریفرمر خارجی

	$\ln K_{R,PR} = -\frac{\Delta g_{R,PR}^{\circ}}{RT_{PR}} = \ln \left[ \frac{(\dot{n}_{CO,7}) \times (\dot{n}_{H_2,7})^3 \left( \frac{P_7}{P_{ref}} \right)^2}{(\dot{n}_{CH_4,7}) \times (\dot{n}_{H_2O,7}) \times \dot{n}_7^2} \right]$	
$\eta_{AB} = \frac{\dot{n}_{13} \bar{h}_{13}}{\dot{n}_{12} \bar{h}_{12} + \dot{n}_4 \bar{h}_4}$	$\dot{n}_{CO_2,13} = \dot{n}_{CO_2,12} + \dot{n}_{CO,12}$ $\dot{n}_{H_2O,13} = \dot{n}_{H_2O,12} + \dot{n}_{H_2,12}$ $\dot{n}_{O_2,13} = \dot{n}_{O_2,4} - \frac{1}{2} \dot{n}_{H_2,12} - \frac{1}{2} \dot{n}_{CO,12}; \dot{n}_{N_2,13} = \dot{n}_{N_2,4}$	پس سوز
$\dot{n}_{11} \bar{h}_{11} + \dot{n}_5 \bar{h}_5 = \dot{n}_6 \bar{h}_6$	$\dot{n}_{11} + \dot{n}_5 = \dot{n}_6$	مخلوط کننده
$\bar{h}_{11} = \bar{h}_{12} = \bar{h}_{10}$	$\dot{n}_{11} + \dot{n}_{12} = \dot{n}_{10}$	جدا کننده



شکل ۶- میانگین ماهانه شدت انرژی تابشی مستقیم و پراکنده در شهر تبریز

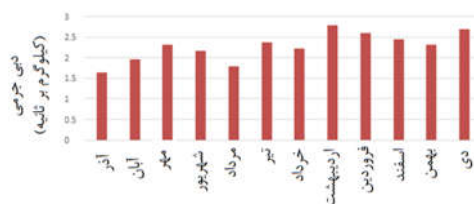
(۷) و با فرض چگالی برابر با ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب برای پساب، میانگین ماهانه دبی جرمی وارد شده به تصفیه‌خانه محاسبه شده است و در شکل ۸ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود دبی جرمی در ماه‌های دسامبر و آگوست کمتر از سایر ماه‌ها است. همچنین میانگین دبی در طی سال ۲/۵ کیلوگرم بر ثانیه بوده است. با استفاده از دبی جرمی ماهانه به عنوان ورودی، میزان مصرف متان در بویلر برای ثابت نگه داشتن دمای هاضم (۳۵ درجه سلسیوس) محاسبه شده است. این محاسبات برای چهار حالت از جمله یک حالت بدون استفاده از متمرکز کننده توان خورشید و سه حالت با استفاده از متمرکز کننده توان خورشید به طوری که انرژی خورشیدی ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ نیاز گرمای نیروگاه را تامین کند، انجام شده است و نتیجه در شکل ۹ ارائه شده است.



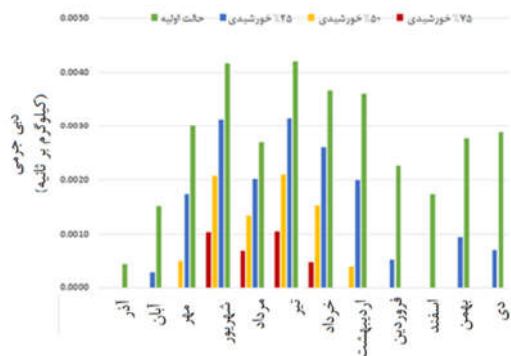
شکل ۷- دبی حجمی پساب ورودی به تصفیه‌خانه [17]

#### ۴- نتایج و بحث

قبل از ورود به نتایج به دست آمده در کار حاضر لازم است که سیستم شبیه‌سازی شده اعتباردهی شود. همانطور که سیستم مطرح شده در بخش‌های قبلی توضیح داده شده است در واقع یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد است که با یک سیستم خورشیدی و چندین مبادله کن گرمای به منظور تامین گرما مورد نیاز برای پیش گرم کردن لجن در محل تصفیه‌خانه که برای تولید زیست‌گاز ضروری است تشکیل یافته است. با توجه به این جزء اصلی این سیستم پیشنهادی پیل سوختی اکسید جامد می‌باشد لذا اعتباردهی به مدل پیل سوختی اکسید جامد می‌تواند در اعتبار کل مدل نقش بسزایی را ایفا کند. برای اعتباردهی مدل پیل سوختی از نتایج تجربی ارائه شده در ادبیات فن که توسط تاء و همکارانش ارائه شده است استفاده می‌گردد. همانطور که از نتایج جدول ۶ مشخص است مقدار ولتاژ و چگالی توان خروجی بین نتایج مدل حاضر و نتایج ارائه شده توسط محققین خطای کمی وجود دارد و نتایج مدل حاضر در یک محدوده قابل اطمینان است. با توجه به این‌که در کار حاضر تحلیل سیستم بازبایی گرمای هدف اصلی است، فرض شده است که پیل سوختی اکسید جامد در شرایط نامی خود کار می‌کند. شرایط نامی برای پیل سوختی مدل‌سازی شده ۶۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. با استفاده از داده‌های ساعتی دبی حجمی پساب اندازه‌گیری شده توسط اداره آب شهر تبریز (شکل



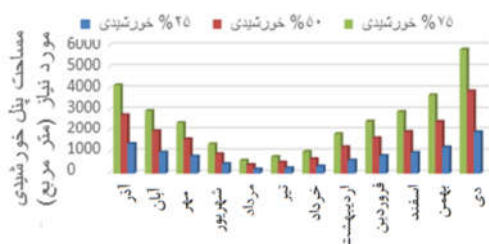
شکل ۸- میانگین دبی گرمای ماهانه پساب ورودی به تصفیه‌خانه



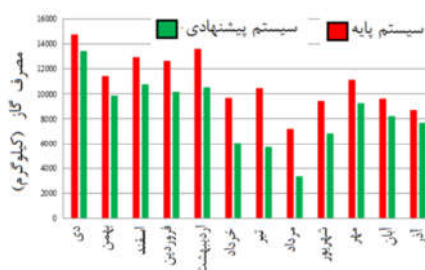
شکل ۹- میزان مصرف متان در بویلر

همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، هنگامی که سیستم متمرکز کننده توان خورشید ۷۵٪ بار گرمای نیروگاه را تامین می‌کند، متان مصرفی به اندازه چشمگیری کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش مصرف متان در ماه مرداد اتفاق می‌افتد که مقدار این کاهش ۷۲٪ است. حتی اگر انرژی گرمای توسط توان خورشید تامین شود مقدار ۵۴٪ صرفه جویی در متان حاصل می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در صورتی که توان خورشید به منظور تامین ۵۰٪ و یا ۷۵٪ انرژی مصرفی در نظر گرفته شود آنگاه دبی مورد نیاز گاز طبیعی از شبکه در بسیاری از ماه‌ها به صفر می‌رسد و تنها می‌توان از طریق زیست‌گاز تولیدی در محل تصفیه‌خانه سوخت مورد نیاز سیستم را تامین نمود. برای ۵۰٪ تامینی توسط سیستم خورشیدی همانطور که از شکل مشخص است آبان ماه تا فروردین ماه این میزان مصرف به صفر می‌رسد. برای ۷۵٪ تامینی توسط سیستم خورشیدی این میزان عدم وابستگی به شبکه به ۸ ماه از سال می‌رسد. این در حالی است که در صورتی که توان انرژی مورد نیاز اگر ۲۵٪ آن توسط گردآور خورشیدی تامین گردد آنگاه فقط در دو ماه اسفند ماه و آذر ماه نیازی به شبکه گاز طبیعی نخواهد بود. در هر صورتی با توجه به در نظر داشتن نیاز انرژی و همچنین با توجه به فضای محل تصفیه‌خانه برای راه اندازی سیستم جدید و بالاخص سیستم خورشیدی این مورد سبک سنگین بایستی گردد که چه میزان فضا به منظور احداث سیستم خورشیدی می‌تواند مناسب باشد. باید اضافه گردد که در این اثنا از طرفی بحث اقتصادی نیز بایستی سبک سنگین گردد چرا که از طرفی با افزایش نقش سیستم خورشیدی میزان مصرف گاز طبیعی که از شبکه ملی خریداری می‌گردد کاهش می‌یابد و از طرفی هزینه احداث مساحت بیشتر برای سیستم خورشیدی افزایش پیدا خواهد کرد. با توجه به برآورد های اولیه در محل تصفیه‌خانه میزان مناسب برای نصب گردآور شاید در حدود ۵۰۰ متر مربع بحث و تبادل نظر باشد که این مطالعه در کار آتی نویسندگان مورد توجه خواهد بود. همچنین میزان

سطح مورد نیاز متمرکز کننده خورشیدی جهت تامین انرژی گرمای نیروگاه برای سه حالت اشاره شده، محاسبه شده است در شکل ۱۰ آمده است. شکل حاضر در حقیقت این مساله را مشخص می‌کند که برای تامین ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ توسط سیستم خورشیدی چه میزان سطح مساحتی برای گردآور لازم خواهد بود. این مساحت برای ماه‌های مختلف متفاوت است چرا که مساحت سیستم خورشیدی پارامتری متغیر در نظر گرفته شده است و در این حالت درصد تامین انرژی توسط سیستم خورشیدی به عنوان ورودی به مدل شبیه‌سازی داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد اگر هدف تامین گرمای ۷۵٪ توسط سیستم خورشیدی باشد برای برخی از ماه‌های سال این مساحت مورد نیاز به حدود ۶۰۰۰ متر مربع نیز خواهد رسید که عملاً برای محل فعلی تصفیه‌خانه این مقدار به لحاظ فضای قابل نصب پنل مناسب نمی‌باشد. از نتایج شکل ۱۰ می‌توان مشاهده نمود که با در نظر گرفتن ۲۵٪ توان خورشیدی در یک محدوده مناسب برای سیستم می‌توان پنل خورشیدی نصب نمود. این مساحت در حدود ۳۰۰ متر مربع تا ۱۵۰۰ متر مربع برای ماه‌های مختلف سال قابل تغییر است. لکن با توجه به توضیحات ارائه شده در خصوص فضای مناسب برای نصب پنل و همچنین برآورد اولیه با نصب ۵۰۰ متر مربع گردآور خورشیدی میزان مصرف مورد نیاز گاز طبیعی در شکل ۱۱ ارائه شده است. این شکل به طور معقولی و شاید بتوان گفت به طور عملیاتی نشان می‌دهد که نصب ۵۰۰ متر مربع از گردآور خورشیدی چه میزان سیستم را وابسته به شبکه ملی گاز در کشور خواهد نمود. در این شکل میزان مصرف گاز در هر ماه نشان داده است که مشخص است کمترین میزان مصرف گاز در حدود ۳۰۰۰ کیلوگرم و بیشترین مقدار ۱۳۰۰۰ کیلوگرم است که این مقادیر در مقایسه با سیستم پایه و بدون سیستم خورشیدی حتی در بدترین حالت در حدود ۱۰٪ کاهش مصرف گاز را در پی خواهد داشت.



شکل ۱۰- سطح مورد نیاز متمرکز کننده توان خورشید برای تامین ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ نیاز گرمای نیروگاه



شکل ۱۱- میزان مصرف متان با استفاده از ۵۰۰ متر مربع متمرکز کننده توان خورشید



جدول ۶- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تجربی تائو و همکاران [21]

خطا	چگالی توان (وات بر متر مربع) (تائو و همکاران)	چگالی توان (وات بر متر مربع) (کار حاضر)	خطا	ولتاژ سلول (ولت) (تائو و همکاران)	ولتاژ سلول (ولت) (کار حاضر)	چگالی جریان (آمپر بر متر مربع)
-۱/۳۳۳	۰/۱۵	۰/۱۴۸	-۲/۳۶۸	۰/۷۶	۰/۷۴۲	۲۰۰۰
-۲/۳۸۱	۰/۲۱	۰/۲۰۵	۰/۵۸۸	۰/۶۸	۰/۶۸۴	۳۰۰۰
-۲/۶۹۲	۰/۲۶	۰/۲۵۳	۲/۲۵۸	۰/۶۲	۰/۶۳۴	۴۰۰۰
-۰/۳۳۹	۰/۲۹۵	۰/۲۹۴	۲/۱۰۵	۰/۵۷	۰/۵۸۲	۵۰۰۰
۴/۱۲۷	۰/۳۱۵	۰/۳۲۸	۵/۱۹۲	۰/۵۲	۰/۵۴۷	۶۰۰۰

### ۵- نتیجه گیری

اگرچه توان و گرما بسیاری برای تصفیه پساب استفاده می‌شود، اما به طور همزمان مقدار زیادی زیست‌گاز حاوی متان در این فرایند تولید می‌شود. در این کار یک مدل حالت پایا برای شبیه‌سازی یک نیروگاه تولید همزمان پیل سوختی اکسید جامد با توان ۱۸۰ کیلووات با سوخت زیست‌گاز در تصفیه‌خانه پساب شهری ارائه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از پیل‌های سوختی اکسید جامد به همراه سیستم متمرکز کننده توان خورشید می‌تواند گزینه بسیار مناسبی برای تولید همزمان برق و گرما با راندمان بالا در تصفیه‌خانه‌های پساب شهری باشد و با تولید انرژی تجدید پذیر باعث کاهش صدمات زیست محیطی و کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای شود. زیست‌گاز در فرایند هضم بی‌هوازی پساب شهری در یک‌هضم تولید می‌شود و به پیل‌های سوختی اکسید جامد خورنده می‌شود. گرمای مورد نیاز برای گرم کردن پساب و تامین اتلاف گرماهاضم از طریق بازیابی گرمای گازهای خروجی پیل سوختی و متمرکز کننده‌های خورشیدی تامین می‌شود.

مدل‌سازی نشان داد که تامین بخشی از گرمای مورد نیاز هاضم از طریق توان خورشید می‌تواند باعث صرفه جویی مقدار مصرف گاز طبیعی در این نیروگاه باشد. در تصفیه‌خانه‌هایی که از فضای بیشتری برخوردار هستند، با بهره‌گیری از سطح بیشتر متمرکز کننده و با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی گرما می‌توان به طور کامل از سوزاندن سوخت در بویلر جلوگیری کرده و در هزینه‌های جاری صرفه جویی نمود. سیستم بررسی شده به طور کلی ترکیبی از فناوری‌های انرژی تجدید پذیر برای تولید برق و گرما بوده و می‌تواند راه حل هوشمندانه‌ای برای استفاده به همراه تصفیه پساب شهری باشد که این اجازه را می‌دهد یک زنجیره پایدار پسماند به انرژی تعریف شود.

### تقدیر و تشکر

از مقاله حاضر تحت قرارداد طرح پژوهشی به شماره (۹۷/د/آپ/۱۹۲۱) در دانشگاه بناب از نویسنده مسئول حمایت شده است.

### ۶- پیوست الف

در این بخش مدل سازی پیل سوختی با جزئیات ارائه می‌شود. در پیل سوختی اکسید جامد، انباره بخش کلیدی سیستم است که مدل

سازی دقیق آن به منظور بدست آوردن ولتاژ خروجی واقعی و در نتیجه آن توان خالص خروجی از سیستم اهمیت بیش از پیشی پیدا می‌کند.

ولتاژ سلول از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$V_c = V_N - V_{loss} \quad A1$$

افت ولتاژ از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$V_{loss} = V_{ohm} + V_{act} + V_{conc} \quad A2$$

$V_N$  از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$V_N = -\frac{\Delta \bar{g}^o}{2F} + \frac{\bar{R}T_{FC}}{2F} \ln \left( \frac{a_{H_2}^{Anode,exit} \sqrt{a_{O_2}^{Cathode,exit}}}{a_{H_2O}^{Anode,exit}} \right) \quad A3$$

قسمت های مختلف افت ولتاژ را می‌توان از روابط زیر تعیین کرد.

$$V_{ohm} = (R_{int} + \rho_{an} L_{an} + \rho_{cat} L_{cat} + \rho_{ely} L_{ely}) j$$

$$V_{act} = V_{act,an} + V_{act,cat} \quad A4$$

$$V_{act,an} = \frac{\bar{R}T_{FC}}{F} (\sinh^{-1}(\frac{j}{2j_{0,an}}))$$

$$V_{act,cat} = \frac{\bar{R}T_{FC}}{F} (\sinh^{-1}(\frac{j}{2j_{0,cat}}))$$

$j$  های مختلف از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$j_{0,an} = \gamma_{an} \left( \frac{RT_{FC}}{2F} \right) e^{\left( -\frac{E_{a,an}}{RT_{FC}} \right)} \quad A5$$

$$j_{0,cat} = \gamma_{cat} \left( \frac{RT_{FC}}{2F} \right) e^{\left( -\frac{E_{a,cat}}{RT_{FC}} \right)}$$

افت غلظت مجموع افت های غلظت رخ داده در آند و کاتد است و از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$V_{conc} = V_{conc,an} + V_{conc,cat} \quad A6$$

$$V_{conc,an} = \frac{RT_{FC}}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{H_2O,TPB}}{P_{H_2O} P_{H_2,TPB}} \right)$$

- analyses of polygenerating high temperature fuel cells. Int J Hydrogen Energy; Vol, 36, pp. 100 44–56, 2011.
- [8] Margalef P, Brown T, Brouwer J, Samuelsen S. Efficiency of poly-generating high temperature fuel cells. J Power Sources; Vol. 196, pp. 2055–60, 2011.
- [9] Sanchez D, Monje B, Chacartegui R, Campanari S. Potential of molten carbonate fuel cells to enhance the performance of CHP plants in sewage treatment facilities; Vol. 8, 2012.
- [10] Trendewicz AA, Braun RJ. Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities. J Power Sources; Vol. 233, pp. 380–93, 2013.
- [11] Borello D, Evangelisti S TE. Modeling of a CHP SOFC System Fed with Biogas from Anaerobic Digestion of Municipal Waste Integrated with Solar Collectors and Storage Unit. Int J Thermodyn; Vol. 16, No. 1, pp.28–35, 2013.
- [12] de Arespacochaga N, Valderrama C, Peregrina C, Mesa C, Bouchy L, Cortina JL. Evaluation of a pilot-scale sewage biogas powered 2.8 kWe Solid Oxide Fuel Cell: Assessment of heat-to-power ratio and influence of oxygen content. J Power Sources; Vol. 300, pp.325–35, 2015.
- [13] Papurello D, Lanzini A, Tognana L, Silvestri S, Santarelli M. Waste to energy: Exploitation of biogas from organic waste in a 500 Wel solid oxide fuel cell (SOFC) stack. Energy; Vol. 85, pp. 145–58, 2015.
- [14] SOFC CCHP with Poly-fuel Operation and Maintenance n.d. , [Http://www.sofcom.eu](http://www.sofcom.eu). SOFCOM Project,
- [15] Gandiglio M, Lanzini A, Santarelli M, Leone P. Design and balance of plant of a demonstration plant with a Solid Oxide Fuel Cell fed by biogas from Waste-water and exhaust carbon recycling for algae growth. J Fuel Cell Sci Technol; Vol.11, pp. 8-14, 2013.
- [16] Cheremisinoff NP. Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies. 2002.
- [17] شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی-واحد بهره‌وری انرژی n.d. <https://www.abfar-as.ir/>.
- [18] Papadidas DD, Ahmed S, Kumar R. Fuel quality issues with biogas energy - An economic analysis for a stationary fuel cell system. Energy; Vol, 44, pp. 257–277, 2012.
- [19] Soltigua Company n.d.<http://www.soltigua.com/>.
- [20] Mosayebzhad M, Mehr AS, Gandiglio M, Lanzini A, Santarelli M. Techno-economic assessment of biogas-fed CHP hybrid systems in a real wastewater treatment plant; Vol.129, pp.1263–80, 2018.
- [21] Tao G, Armstrong T VA. Intermediate temperature solid oxide fuel cell (IT-SOFC) research and development activities at MSRI. ACERC&ICES Conf., Utah: 2005.

$$V_{conc,cat} = \frac{RT_{FC}}{4F} \log\left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2,TPB}}\right)$$

برای محاسبه فشار در قسمت محصولات روابط زیر استفاده می شود.

$$P_{H_2O,TPB} = P_{H_2O,an} + j \frac{RT_{FC} L_{an}}{2F D_{an,H_2}^{eff}}$$

$$P_{H_2,TPB} = P_{H_2,an} - j \frac{RT_{FC} L_{an}}{2F D_{an,H_2O}^{eff}}$$

A7

$$P_{O_2,TPB} = P_{cat} - (P_{cat} - P_{O_2,cat}) \exp\left(j \frac{RT_{FC} L_{cat}}{4F D_{O_2}^{eff} P_{cat}}\right)$$

ضرایب نفوذ موثر از روابط زیر تعیین می شوند.

$$\frac{1}{D_{an,H_2}^{eff}} = \frac{\varepsilon_{an}}{\tau_{an}} \left( \frac{1}{D_{H_2,K}} + \frac{1}{D_{H_2,H_2O}} \right)$$

$$\frac{1}{D_{an,H_2O}^{eff}} = \frac{\varepsilon_{an}}{\tau_{an}} \left( \frac{1}{D_{H_2O,K}} + \frac{1}{D_{H_2O,H_2}} \right)$$

A8

$$\frac{1}{D_{cat,O_2}^{eff}} = \frac{\varepsilon_{cat}}{\tau_{cat}} \left( \frac{1}{D_{O_2,K}} + \frac{1}{D_{O_2,N_2}} \right);$$

$$\varepsilon = 0.48; \tau = 5.4.$$

ضرایب نفوذ از روابط زیر تعیین می شود.

$$D_{H_2,K} = 97 r_{pore,an} \sqrt{\frac{T_{FC}}{M_{H_2}}}$$

$$D_{H_2O,K} = 97 r_{pore,an} \sqrt{\frac{T_{FC}}{M_{H_2O}}}$$

$$D_{O_2,K} = 97 r_{pore,cat} \sqrt{\frac{T_{FC}}{M_{O_2}}}$$

A9

$$D_{H_2,H_2O} = \frac{1.43 \times 10^{-7} T_{FC}^{1.75}}{\sqrt{M_{H_2,H_2O} (V_{H_2}^{1/3} + V_{H_2O}^{1/3})^2 P}}$$

$$D_{O_2,N_2} = \frac{1.43 \times 10^{-7} T_{FC}^{1.75}}{\sqrt{M_{O_2,N_2} (V_{O_2}^{1/3} + V_{N_2}^{1/3})^2 P}}$$

## ۷- مراجع

- [1] 2050 Energy strategy - European Commission n.d <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2050-energy-strategy>
- [2] Eastern Research Group Inc., Analysis E and E. Opportunities for Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities: Market Analysis and Lessons from the Field Combined Heat and Power Partnership. US EPA, CHP Partnersh 57, 2011.
- [3] CWW. Evaluation of Combined Heat and Power Technologies for Wastewater Facilities 244,2012.
- [4] Larminie J, Dicks A. Fuel cell systems explained. 2003.
- [5] FuelCell Energy Inc. "FuelCell Energy: Ultra Clean, Efficient, Reliable Power" 2015.
- [6] Convion Fuel Cell Systems n.d <http://convion.fi/>.
- [7] Margalef P, Brown T, Brouwer J, Samuelsen S. Conceptual design and configuration performance