

## امکان سنجی احداث دو واحد همزمان تولید حرارت و برق با بیوگاز در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری

دانشجوی دکتری، مهندسی گروه مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران  
استادیار، مهندسی گروه مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران  
جانشین مدیر امور فاضلاب و محیط زیست، شرکت مهندسی مشاور طوس آب، مشهد، ایران

فهیمة سلمانی\*  
احسان امیری راد  
محمدرضا سلیمی

### چکیده

محدودیت منابع سوخت فسیلی و حفظ محیط زیست، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را دارای اهمیت نموده است. از بین انواع انرژی‌های نو، بیوگاز قابل استحصال از لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به دلیل دائمی بودن فاضلاب بعنوان یک منبع پایدار انرژی به شمار می‌روند. در این تحقیق فرآیند موتور بیوگازسوز قابل اجرا در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری کاشان بررسی شده است. اجرای این سیستم می‌تواند باعث کاهش هزینه سوخت و نیز استفاده از انرژی‌های نو در تولید انرژی‌های الکتریکی و حرارتی قابل اعتماد برای بخشی از مصارف فرآیندی شود. برای این منظور مشخصات بیوگاز تولیدی در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری کاشان به عنوان نمونه مورد بررسی قرار گرفته و پس از تشریح کامل اجزای مورد نیاز جهت نصب و احداث موتور بیوگازسوز به طراحی آن جهت تولید حدود ۴۶۶ کیلووات برق و ۵۵۶ کیلووات حرارت پرداخته شده است. هزینه‌های نصب و سرمایه‌گذاری لازم برای احداث دو واحد تولید همزمان حرارت و برق با بیوگاز حدود ۲۷۰۰۰۰ دلار برآورد شده است که با توجه به درآمدهای حاصل از فروش برق و محصولات جانبی می‌توان گفت طی ۴ سال تمام سرمایه‌گذاری انجام شده برگشت داده خواهد شد. همچنین استفاده از لجن در فن‌آوری تولید بیوگاز باعث کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای چون متان و دی‌اکسیدکربن می‌گردد. **واژه‌های کلیدی:** بیوگاز، موتور بیوگازسوز، تصفیه‌خانه فاضلاب، هزینه سرمایه‌گذاری، گازهای گلخانه‌ای.

## The Feasibility of Building Two units Combined Heat and Power (CHP) With Biogas in Urban Wastewater Treatment Plant

F. Salmani  
E. Amirirad  
M. R. Salimi

Mech. Eng., Sabzevar Univ, Sabzevar, Iran  
Mech. Eng., Sabzevar Univ, Sabzevar, Iran  
Head of expert division of Sewerage & Environment dept, Toossab Consulting Eng, Mashhad, Iran

### Abstract

Limitation of fossil fuel resources together with commitment to conservation of environments have caused the views to be focused on the use of renewable energy resources. Biogas is produced by the anaerobic decomposition of organic matter in WWTPs (wastewater treatment plants) and is considered to be a sustainable energy resource due to permanency of wastewater flow. This research focuses the process of biogas fuel engine implemented in Kashan WWTPs. This system can reduce the fuel consumption rate and use renewable energies in production of heat and electrical power reliable a part of processing consumption of WWTPs. Specifications of biogas production in Kashan WWTPs is taken as sample and the necessary elements for installation and construction of biogas fuel engine are described and then two cogeneration units are designed for producing 466 kW electricity and 556 kW heat. Costs of installations and total capital investment required for this power plant is calculated about 270,000\$, which can be returned in 4 years through sales of electricity and other by-products. Also using wastewater for producing biogas reduces greenhouse emission such as methane and carbon dioxide.

**Keywords:** Biogas, Biogas engine, Wastewater treatment, Total capital costs, Greenhouse.

گزینه‌ها، استفاده از انرژی حاصل از منابع زیست توده<sup>۱</sup> مانند بیوگاز می‌باشد.

در گذشته، تمام توجه بر روی کیفیت پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بوده است. با رشد فن‌آوری، امکان حذف بیولوژیکی مواد آلی و مغذی از فاضلاب حاصل شده است. امروزه، علاوه بر توجه بر روی کیفیت پساب خروجی، کاهش مصرف انرژی نیز یکی از نگرانی‌های عمده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب<sup>۲</sup> محسوب می‌شود [۱]. به عنوان مثال روش لجن فعال<sup>۳</sup> جزء معمولترین

### ۱- مقدمه

در سالهای اخیر روند رو به رشد مصرف انرژی، موجب بحران انرژی در جهان گردیده است. مصرف روز افزون انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی اگر چه رشد سریع اقتصادی جوامع مختلف را به همراه داشته است، اما بواسطه انتشار آلاینده‌های حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی و پیامدهای ناشی از آن، جهان را با تغییرات تهدیدآمیزی روبرو کرده است. از سوی دیگر محدودیت منابع فسیلی و تجدید ناپذیر بودن این منابع موجب گردیده است تا سیاستگذاران و برنامه‌ریزان بخش انرژی، حرکت به سوی سوخت‌های پاک را در رؤس برنامه‌های خود قرار دهند. یکی از این

<sup>1</sup> Biomass

<sup>2</sup> Wastewater treatment plants

<sup>3</sup> Activated sludge system

روش‌های تصفیه بیولوژیکی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بشمار می‌رود. اما میزان مصرف انرژی در این روش تقریباً بیشتر از ۴۰٪ کل انرژی الکتریکی مورد نیاز یک تصفیه‌خانه می‌باشد که میزان مصرف انرژی بالایی را بخود اختصاص می‌دهد [۲]. مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بستگی به عوامل مختلفی از جمله؛ ظرفیت و ابعاد تصفیه‌خانه، نوع فرآیند تصفیه، مشخصات کمی و کیفی فاضلاب ورودی و... دارد. اما بطور کلی میزان انرژی مصرفی در سال به ازاء هر نفر بین ۱۰۸۰۰۰ تا ۲۱۶۰۰۰ کیلوژول برآورد شده است [۳].

باتوجه به موضوع، چالش جدید تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کاهش مصرف انرژی است. محققان زیادی بر روی جنبه‌های مختلف رسیدن به خودکفایی انرژی در تصفیه‌خانه‌ها متمرکز شده‌اند. چادوبا و همکارانش [۴]، اسواردل و کراس [۵]، بالمر و هلستروم [۶]، برای کاهش مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب دو روش را ارائه کردند: ۱- بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحدهای مختلف تصفیه‌خانه.

۲- استفاده از فن‌آوری هضم بی‌هوازی جهت تولید بیوگاز و مصرف آن به عنوان سوخت [۷ و ۸].

مواد جامد (TS)<sup>۱</sup> موجود در فاضلاب خام در حدود ۳/۲ kJ/gTS انرژی ذخیره شده دارند، در حالیکه متوسط انرژی مصرفی مورد نیاز برای تصفیه فاضلاب خام فقط ۰/۳۵ kJ/gTS می‌باشد [۹]. این بدین معنی است که کل انرژی موجود در فاضلاب خام بیشتر از انرژی الکتریکی مورد نیاز برای فرآیند تصفیه است. در نتیجه در صورتیکه تکنولوژی بازبایی مناسب انرژی برای فاضلاب طراحی شود، حتی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌توانند تولیدکننده خالص انرژی‌های تجدیدپذیر نیز باشند [۱۰]. در این زمینه هضم بی‌هوازی<sup>۲</sup> یک فن‌آوری توسعه یافته است که معمولاً برای بازیافت انرژی از مواد آلی استفاده می‌شود و قادر به تبدیل ترکیبات آلی به بیوگاز است [۱۱].

بیوگاز مخلوطی از سه گاز عمدتاً متان، دی‌اکسید کربن و سولفید هیدروژن است. بخش قابل اشتعال بیوگاز متان است که حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد آن را شامل می‌شود با سوختن یک مترمکعب از آن ۳۷۱۰۰ کیلوژول انرژی گرمایی تولید می‌شود، که در مقایسه با سایر مواد سوختی، رقم قابل توجهی است [۱۲].

سیلوستر و همکارانش با مطالعه موردی بر روی ۵ تصفیه‌خانه فاضلاب شهری در کاتالونیا (شمال شرق اسپانیا) نشان دادند که باتوجه به فرآیند تصفیه‌خانه و نحوه بهره‌برداری از آنها درصد تولید بیوگاز متفاوت خواهد بود، آنها نشان دادند که بین ۳۹ تا ۷۶ درصد از کل انرژی الکتریکی مورد نیاز تصفیه‌خانه فاضلاب را می‌توان از بیوگاز تامین کرد [۱۳].

جنیسک و همکارانش با تغییر شرایط بهره‌برداری در تصفیه‌خانه مرکزی پراگ تاثیرات ۵ پارامتر (از جمله افزایش دمای عملیاتی، بهبود اختلاط در هاضم و...) را بر میزان تولید بیوگاز بررسی کردند و نشان دادند با بهره‌برداری صحیح از فن‌آوری هضم بی‌هوازی می‌توان تولید بیوگاز را بهینه نمود. آنها توانستند تولید بیوگاز را ۱۲/۵ مترمکعب به ازاء هر نفر در سال افزایش دهند، که در نهایت بین ۱۵ تا ۲۳/۵ کیلووات ساعت به ازاء هر نفر در سال افزایش تولید انرژی را گزارش کردند [۱۴]. بیوگاز تولیدی می‌تواند به عنوان سوخت مشعل، سوخت برای حمل و نقل در جاده‌ها، کنترل دمای راکتور، تزریق در شبکه گاز شهری و یا برای تولید برق و حرارت استفاده شود [۱۵].

از آنجائیکه در فرآیند تولید برق معمولاً گرما نیز به موازات آن تولید می‌گردد. بنابراین بازیافت گرما در چنین فرآیندی امکان پذیر است. این چنین نیروگاههایی را نیروگاه یا واحدهای تولید همزمان برق و حرارت (CHP)<sup>۳</sup> می‌نامند [۱۶]. استفاده از واحدهای تولید همزمان برق و حرارت هم در واحدهای صنعتی و هم در مصارف خانگی کاربرد دارد، که نسبت تولید برق به حرارت برای مصارف صنعتی بین ۰/۲ تا ۰/۳ و در مصارف خانگی بین ۰/۴ تا ۰/۶ است [۱۷].

معمولاً در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، انرژی الکتریکی مصرفی از شبکه توزیع سراسری برق تامین و انرژی حرارتی مورد نیاز فرآیندها از سوزاندن سوختهای فسیلی در بویلرها تامین می‌گردد. لیکن با بکارگیری CHP، انرژی الکتریکی مصرفی به صورت متمرکز از نیروگاه با سوخت بیوگاز تامین و انرژی گرمایی از گازهای داغ خروجی دودکش موتور بیوگازی تامین می‌گردد، از مهمترین سیستم‌های CHP می‌توان به توربین‌های گاز، موتورهای گازی (موتورهای رفت و برگشتی) و میکروتوربین‌ها که همگی مجهز به سیستم بازیافت گرما هستند، اشاره نمود [۱۷].

در سال ۱۳۷۸ سازمان انرژیهای نو ایران پروژه‌ای را در زمینه احداث یک نیروگاه بیوگازسوز در ساوه تعریف نمود. ظرفیت تولید این نیروگاه ۶۹۳۰ متر مکعب گاز در روز و توان آن ۳۰۶ کیلو وات است و همچنین ۶۲۰۰ تن سالانه تولید کود حاصل از پسماند این نیروگاه است [۱۸]. در حال حاضر نیروگاه بیوگازسوز مشهد نیز در دو واحد ۳۰۰ کیلوواتی نیروگاه قادر است، برق مصرفی حدود ۶۰۰ خانوار را با استفاده از گاز حاصله از زباله‌های دفن شده در محل کارخانه کمیوست فراهم نماید [۱۹]. نیروگاه بیوگازسوز شیراز نیز در چند مرحله طراحی و ساخته شده است، این نیروگاه توان تولید ۱۰۶۵ کیلووات ساعت برق را تا سال ۹۴ پیدا خواهد کرد [۲۰].

لذا قدم‌های اولیه برای رسیدن به تکنولوژی نیروگاهی بیوگازسوز در کشور برداشته شده است، از آنجائیکه بهبود کارایی انرژی در تولید انرژی و اصلاح تولید برق از سیاستهای بنیادین کشور بشمار

1 Total solid

2 Anaerobic Digestion

3 Combined heat and power

لجن فعال- اختلاط کامل و مدول دوم مستقل از مدول اول با فرآیند پیشرفته لجن فعال (از نوع  $A^2O$ )<sup>۱</sup> می‌باشد. مشخصات کمی و کیفی فاضلاب و لجن تصفیه‌خانه فاضلاب کاشان به شرح (جدول ۱) است [۲۳].

جدول ۱- مشخصات کمی و کیفی فاضلاب و لجن تصفیه‌خانه کاشان [۲۳].

پارامتر	واحد	مدول اول	مدول دوم
جمعیت تحت پوشش	نفر	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰
دبی طراحی فرآیند	$m^3/day$	۲۴۰۰۰	۲۴۰۰۰
$BOD_5$	mg/lit	۲۳۵	۲۳۵
مقدار لجن اولیه و ثانویه (مدول ۱ و ۲)	(kg/day)	۱۶۰۰۰	
جریان لجن اولیه و ثانویه (مدول ۱ و ۲)	( $m^3/day$ )	۳۸۵	
درصد لجن تغلیظ شده	%	۴	

### ۳-۱-۲- مشخصات فنی تصفیه‌خانه فاضلاب کاشان

برق مورد نیاز تصفیه‌خانه کاشان توسط شبکه برق و بارگرمایشی آن توسط دو بویلر ۳۰۰ کیلوواتی تامین می‌شود. سوخت مورد نیاز بویلرها گاز طبیعی است. توان حرارتی بویلرها حدود ۶۰۰ کیلووات است که حرارت تولیدی توسط بویلر با دمای ۷۰ درجه سلسیوس وارد ۲ مبادله‌کن گرما با ظرفیت حرارتی ۵۰۰ کیلووات می‌شود تا گرمای مورد نیاز برای تصفیه بی‌هوازی لجن بیولوژیکی تامین گردد. (جدول ۲) مشخصات فنی تصفیه‌خانه در حالت معمول را ارائه می‌نماید.

**حالت دوم:** استفاده از موتور بیوگازسوز جهت تولید انرژی الکتریکی در تصفیه‌خانه فاضلاب کاشان (تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کاشان با CHP).

### ۳-۲-۱- تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کاشان همراه با CHP

با توجه به پتانسیل تولید گاز متان در تصفیه‌خانه فاضلاب کاشان چنانچه از این گاز استفاده بهینه نشود، می‌بایست سوزانده شود که این امر باعث آلودگی محیط‌زیست و اتلاف انرژی خواهد شد.

می‌آید. بنابراین ضرورت مطالعه و بررسی برای ترویج و توسعه احداث نیروگاه‌های CHP بالاخص با استفاده از منابع بیوماس احساس می‌گردد.

در این تحقیق با مطالعه فرآیند تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کاشان به تحلیل اقتصادی استفاده از یک واحد تولید همزمان برق و حرارت از نوع موتوربیوگاز سوز جهت تولید ۴۶۶ کیلووات برق و ۵۵۶ کیلووات حرارت پرداخته شده است که این طرح علاوه بر بازگشت سرمایه در کوتاه مدت، باعث کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای چون متان و دی‌اکسیدکربن می‌گردد.

### ۲- شرح سیستم تولید همزمان (CHP)

تجهیزات مورد نیاز برای این بخش یک دستگاه موتوربیوگازسوز، ژنراتور بهمراه تاسیسات برقی انتقال به شبکه و سیستم‌های بازیافت گرما است. از گرمای گازهای حاصل از احتراق می‌توان برای گرمایش محتویات هاضم استفاده نمود که منجر به افزایش بازده تولید بیوگاز در آن می‌شود. در نیروگاه به یک مشعل نیاز است تا در صورت وقوع اتفاق گازهای داخل سیستم را به سمت آن هدایت کرده و ایمنی لازم تامین شود. البته در تمام تصفیه‌خانه‌هایی که دارای هاضم می‌باشند، مشعل وجود دارد و نیاز به هزینه برای این وسیله نیست [۲۲،۲۱].

### ۳- مطالعه موردی (تصفیه‌خانه فاضلاب شهری کاشان)

میزان بیوگاز تولیدی سالیانه از هاضم‌های بی‌هوازی در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری کاشان حدود ۲۷۱۰۰۰۰ مترمکعب (با دبی تقریبی ۳۱۰ مترمکعب بر ساعت) برآورد می‌گردد. متناظر با این مقدار بیوگاز، ۳۰۰۰۰۰ کیلوگرم لجن مرطوب در روز وارد مخازن هضم بی‌هوازی می‌شود. حجم مخزن هاضم مورد استفاده حدوداً ۸۴۲۰ مترمکعب است. بنا به ملاحظات طراحی استفاده از دو واحد هاضم بی‌هوازی استوانه‌ای شکل با حجم ۴۲۱۰ مترمکعب بصورت موازی در دستور کار قرار دارد [۲۴،۲۳]. دمای عملیاتی هاضم ۳۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است [۲۵]. از طرفی با توجه به نیاز برق تصفیه‌خانه که در حدود ۴۶۶ کیلووات است، بهترین پیشنهاد برای نصب و راه اندازی سیستم تولید همزمان برق و حرارت موتوربیوگازسوز است. در ادامه شرایط بهره‌برداری از تصفیه‌خانه در دو حالت کلی بررسی شده است:

**حالت اول:** بدون در نظر گرفتن موتور بیوگازسوز (تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کاشان بدون CHP).

### ۳-۱-۱- مشخصات کمی و کیفی تصفیه‌خانه فاضلاب

تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کاشان برای دو مدول و با ظرفیت کل ۲۰۰ هزار نفر طراحی شده است. مدول اول بر مبنای فرآیند

<sup>۱</sup> Anaerobic-Anoxic-Oxic process

جدول ۲- مشخصات فنی تصفیه‌خانه [۲۳]

مشخصات	سوخت بویلر	-	گاز طبیعی
بویلر	ظرفیت گرمایی	kW	۳۰۰
	تعداد بویلر	-	۲
	راندمان	%	۷۰
مشخصات مبدل	تعداد مبادله‌کن	-	۲
	ظرفیت گرمایی	kW	۲۵۰
	گرمای مورد نیاز برای لجن	kW	۳۵۷
هاضم	کل تلفات گرمایی	kW	۶۶
	گرمای داده شده	kW	۴۳۲
	تعداد	-	۲
مشخصات	میزان CO <sub>2</sub> تولیدی	g/kWh	۵۸۰
گازهای خروجی	میزان NO <sub>x</sub> تولیدی	g/kWh	۲۵-۱۵
از بویلر	میزان CO تولیدی	g/kWh	۱-۲

#### ۴-۱- میزان و ارزش حرارتی بیوگاز فاضلاب

باتوجه به درصد گاز خروجی هاضم‌های فاضلاب، ارزش حرارتی بیوگاز برابر ۲۶۰۰۰ کیلوژول بر متر مکعب برآورد می‌گردد [۲۶، ۱۲].

#### ۴-۲- قابلیت تولید انرژی

میزان بیوگاز تولیدی سالانه از هاضم‌های بی‌هوازی تصفیه‌خانه فاضلاب حدود ۲۷۱۰۰۰۰ متر مکعب می‌باشد. ارزش حرارتی این مقدار بیوگاز با ۱۸۹۰۰۰۰ متر مکعب گاز طبیعی برابر است. این بیوگاز را می‌توان برای تامین حرارت مورد نیاز هاضم‌های فاضلاب یا سایر مصارف استفاده نمود. بنابراین با بهره‌برداری حداکثر از تصفیه‌خانه، سالانه معادل ۱۸۹۰۰۰۰ مترمکعب در مصرف گاز طبیعی صرفه‌جویی خواهد شد. ازطرفی راندمان الکتریکی معمول موتوربیوگاز سوز حدود ۳۸ درصد است. بنابراین در صورتی که بیوگاز تولیدی در موتور بیوگازسوز جهت تولید توان الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد، قابلیت تولید ۴۶۶ کیلووات توان الکتریکی را داراست. در صورت استفاده از سیستم تولید همزمان برق و حرارت جهت تامین آب گرم، حدود ۵۵۶ کیلووات توان حرارتی نیز قابل بازیافت است.

#### ۴-۳- سرمایه‌گذاری اولیه طرح

هزینه احداث موتور بیوگاز سوز به ازاء ۴۶۶ کیلووات برق ۲۶۹۸۳۷ دلار است. با توجه به اینکه اکثر تصفیه‌خانه‌های امروزی مجهز به هاضم، مشعل و مبادله‌کن گرمایی می‌باشند، قیمت این وسایل از سرمایه‌گذاری لازم کسر شده است. سرمایه‌گذاری کل برابر مجموع سرمایه در گردش و سرمایه ثابت طرح است. لیست تجهیزات مورد نیاز خریداری شده برای سیستم تولید همزمان موتورگازی و سایر اجزای سرمایه‌گذاری به‌مراه ظرفیت پیشنهادی و قیمت آنها در (جدول ۴) ارائه شده است. لازم بذکر است که با توجه به وارداتی بودن برخی اقلام و نیز برای جلوگیری از نوسانات قیمت ارز، قیمت تجهیزات به دلار گزارش شده و قیمت هر دلار ۳۲۰۰۰ ریال در نظر گرفته شده است [۲۷].

#### ۴-۴- درآمدهای بلقوه طرح

درآمد این طرح از بخش‌های زیر تشکیل شده است:

##### الف- درآمد حاصل از فروش برق

بخش اول درآمد حاصل از فروش برق، که براساس مصوبه شماره ۸۴۴/۱۸۱۵۵۶/ت ۵۰۱۵۰ هـ مورخ ۹۲/۱۲/۶ هیئت وزیران برابر ۸۴۴ ریال در ساعات پرباری (۴ ساعت) و میان‌باری (۲۰ ساعت) ۴۲۲ ریال و در ساعات کم‌باری (۴ ساعت) ۲۱۱ ریال برای هر کیلووات ساعت برق می‌باشد. بنابراین با فرض ۴۶۶ کیلووات توان موتور بیوگازسوز و ۷۲۰۰ ساعت کارکرد سالانه، درآمد ناشی از فروش

ازطرفی با توجه به پرداخت یارانه بر روی تعرفه برق به مصرف کنندگان از جانب دولت، در صورت استفاده از توان الکتریکی قابل تامین از بیوگاز تصفیه‌خانه فاضلاب کاشان، امکان فروش برق به دولت نیز وجود دارد. در نتیجه استفاده از سیستم تولید همزمان (CHP) بیوگاز سوز با توان تولید ۴۶۶ کیلووات برق و توان حرارتی حدود ۵۵۶ کیلووات برای تصفیه‌خانه فاضلاب کاشان پیشنهاد شده است. در این حالت سوخت مورد نیاز سیستم تولید همزمان از بیوگاز خروجی هاضم‌های بی‌هوازی تصفیه‌خانه تامین می‌شود، برای تامین ۴۶۶ کیلووات برق به ۳۱۰ مترمکعب در ساعت بیوگاز نیاز است، این حجم بیوگاز می‌تواند سوخت مورد نیاز دو موتور بیوگازسوز با ظرفیت ۱۰۲۲ کیلووات را تامین نماید- [۲۱، ۲۰]. مشخصات سیستم موتور بیوگازسوز و میزان گازهای تولیدی آن در (جدول ۳) ارائه شده است.

#### ۴- برآورد اقتصادی

برای انجام برآورد اقتصادی ابتدا باید دبی و ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی تصفیه‌خانه مشخص گردد.

جدول ۳- مشخصات واحد CHP - حالت دوم

مشخصات موتور گازی	تعداد موتور گازی	-	۲
	توان تولید برق	kW	۲۳۳
	توان تولید گرما	kW	۲۷۸
	میزان مصرف متان	Nm <sup>3</sup> /h	۱۰۲٫۳
	راندمان الکتریکی	%	۳۸٫۱
مشخصات	میزان NO <sub>x</sub> تولیدی	mg/Nm <sup>3</sup>	<۵۰۰
گازهای تولیدی	میزان CO تولیدی	mg/Nm <sup>3</sup>	<۱۰۰۰

جدول ۴- نتایج سرمایه‌گذاری طرح (دلار) [۲۷]

اجزای سرمایه گذاری	هزینه در حالت بدون خرید
تجهیزات خریداری شده	هواضم، مبدل و بویلر
نصب تجهیزات	۱۲۱۶۳۶
ابزار دقیق و کنترل	۴۵۵۱
لوله‌کشی	۴۳۶۵
تاسیسات الکتریکی	۲۳۳
ساختمان‌ها و محوطه سازی	۶۵۲۴۰
مهندسی نظارت	۳۹۶۱۰
هزینه‌های کارگاهی	۳۴۴۵
حق الزحمه پیمانکاری	۴۶۶۰
متفرقه	۶۵۲۴
کل سرمایه ثابت (FCI)	۱۳۹۸۰
سرمایه در گردش (WCI)	۲۶۴۲۴۵
کل سرمایه‌گذاری (TCI)	۵۵۹۲
	۲۶۹۸۳۷

ریال در نظر گرفته شده است. لذا درآمد حاصل از فروش کود حدود ۶۰۰۰۰ دلار (۱۹۱۵ میلیون ریال) در سال است [۲۷].

### د- درآمد از محل اعتبارات حاصل از کاهش گازهای گلخانه‌ای یا مکانیزم توسعه پاک (CDM)<sup>۱</sup>

بخش سوم درآمد ناشی از فروش اعتبارات حاصله از "مکانیزم توسعه پاک" جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. مکانیزم توسعه پاک، از جمله مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر پروتکل کیوتو<sup>۲</sup> است که براساس آن کشورهای توسعه یافته اجازه می‌یابند، طبق تعهد خود پروژه‌های کشورهای در حال توسعه را که منجر به کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌شوند را حمایت کنند [۱۲].

این طرح از دو طریق انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد: (۱) جلوگیری از انتشار متان به اتمسفر و (۲) تولید برق و حرارت از منابع تجدیدپذیر و جلوگیری از انتشار CO<sub>2</sub> ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی.

به منظور برآورد میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از مشخصات (جدول ۶) استفاده شده است. برای ضریب اطمینان فرض می‌شود، تولید بیوگاز در شرایط واقعی حدود ۸۵ درصد مقدار پیش‌بینی شده باشد که برابر ۶۴۰۰ مترمکعب در روز خواهد بود [۲۳].

### ۱) کاهش انتشار مربوط به جلوگیری از انتشار متان به اتمسفر: ضریب گرمایش جهانی متان ۲۱ برابر دی اکسید کربن است، لذا کاهش انتشار حاصل از این بخش از پروژه $\frac{24586}{y}$ است.

جدول ۶- فرضیات لازم برای محاسبه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای [۲۳]

عنوان	واحد	مقدار
نرخ تولید بیوگاز در شرایط واقعی	Nm <sup>3</sup> /d	۶۴۰۰
غلظت متان در بیوگاز	درصد حجمی	۷۰
چگالی متان	kg/ Nm <sup>3</sup>	۰٫۷۱۶

### ۲) کاهش انتشار مربوط به تولید برق و حرارت در CHP :

برق تولید شده در این پروژه بجای برق شبکه سراسری در تصفیه‌خانه مصرف خواهد شد. برای محاسبه کاهش انتشار حاصل از این جایگزینی معمولاً از ضریب انتشار دی اکسید کربن شبکه سراسری استفاده می‌شود. مقدار این ضریب برای شبکه برق ایران حدود ۰/۷ تن دی اکسید کربن به ازای یک مگاوات ساعت است. به این ترتیب، کاهش انتشار حاصل از تولید برق در این طرح برابر  $\frac{2348.6}{y}$  tCO<sub>2e</sub> خواهد بود.

کاهش انتشار در اثر تولید حرارت در CHP نیز از حاصلضرب مقدار گرمای تولید شده و ضریب انتشار دی اکسید کربن گاز

برق برابر ۴۸۶۷۵ دلار (۱۵۵۷ میلیون ریال) خواهد بود. در (جدول ۵) میزان فروش برق سالیانه به تفصیل بیان شده است [۲۷].

جدول ۵- برنامه فروش برق سالیانه [۲۷]

ظرفیت عملی (kW)	ساعات بهره برداری (h)	انرژی تولیدی عملی سالانه (kWh)	نرخ (ریال) برای هر (KWh)	درآمد (میلیون ریال)	درآمد (دلار)
۴۶۶	۱۴۴۰	۶۷۱۰۴۰	۸۴۴	۵۶۶٫۳۶	۱۷۷۰۰
۴۶۶	۴۳۲۰	۲۰۱۳۱۲۰	۴۲۲	۸۴۹٫۵۴	۲۶۵۵۰
۴۶۶	۱۴۴۰	۶۷۱۰۴۰	۲۱۱	۱۴۱٫۵۹	۴۴۲۵
مجموع	۷۲۰۰	۳۳۵۵۲۰۰	-	۱۵۵۷٫۴۹	۴۸۶۷۵

### ب- درآمد ناشی از صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی

کاهش میزان مصرف گاز طبیعی در اثر مصرف بیوگاز تولیدی در جهت تولید گرما نیز از جمله درآمدهای طرح به شمار می‌رود. همانطور که پیش تر گفته شد؛ ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی سالیانه موتور بیوگاز سوز با ۱۸۹۰۰۰۰ متر مکعب گاز طبیعی برابر است. با استفاده از سیستم تولید همزمان برق و حرارت می‌توان نیمی از این حرارت را نیز بازیافت نمود. به عبارت دیگر سالیانه ۹۴۵۰۰۰ مترمکعب در مصرف گاز شهری جهت تامین حرارت مورد نیاز تصفیه‌خانه صرفه جویی خواهد شد. با در نظر گرفتن تعرفه گاز دولتی برابر ۱۰۰۰ ریال بر متر مکعب سالانه ۲۹۵۰۰ دلار (۹۴۵ میلیون ریال) در هزینه گاز صرفه‌جویی خواهد شد که این مبلغ به درآمد طرح افزوده می‌گردد [۲۷].

### ج- درآمد ناشی از فروش کود غنی شده خروجی از هاضم

با توجه به فرآیند تولید کود از لجن باقیمانده می‌توان میزان لجن خشک شده (kg/day) ۱۰۵۰۰ که قیمت هر کیلوگرم کود ۵۰۰

<sup>۱</sup> Clean Development Mechanism

<sup>۲</sup> Kyoto protocol

طبیعی که برابر ۵۶/۱ تن به ازای هر تراژول است  $\frac{tCO_2e}{y}$  1000 بدست می‌آید. خلاصه نتایج محاسبات کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر اجرای طرح در (جدول ۷) ارائه شده است.

بازگشت سرمایه با توجه به درآمد حاصل از فروش برق و محصولات جانبی و سرمایه‌گذاری اولیه ۴ سال محاسبه شده است.

**جدول ۱۰- ارزش فعلی خالص (دلار) [۲۸]**

سال (t)	جریان نقدینگی	ارزش فعلی	ارزش فعلی تجمعی
۰	$\frac{(-269836/83)}{(1 + 0.02)^t}$	۲۶۹۸۳۶/۸۳	-۲۶۹۸۳۶/۸۳
۱	$\frac{(138175 - 55.31/2)}{(1 + 0.02)^t}$	۸۱۳۸۷/۴	-۱۸۴۱۱۱/۵۵
۲	$\frac{(138175 - 55.31/2)}{(1 + 0.02)^t}$	۷۹۷۹۱/۵	-۱۰۰۰۶۷/۱۵
۳	$\frac{(138175 - 55.31/2)}{(1 + 0.02)^t}$	۷۸۲۲۷	-۱۷۶۷۰/۶۸
۴	$\frac{(138175 - 55.31/2)}{(1 + 0.02)^t}$	۷۶۶۹۳	۶۳۱۱۰/۱۶

**جدول ۷- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر اجرای طرح**

ردیف	عنوان	کاهش انتشار $tCO_2e$
۱	کاهش انتشار در اثر جلوگیری از انتشار متان به اتمسفر	۲۴۵۸۶
۲	کاهش انتشار در اثر تولید برق از بیوگاز	۲۳۴۸
۳	کاهش انتشار در اثر تولید حرارت از بیوگاز	۱۰۰۰
	مجموع	۲۷۹۳۵

بنابراین مجموع درآمد سالیانه طرح مطابق (جدول ۸) برابر ۱۳۸۰۰۰ دلار (۴۴۱۷ میلیون ریال) می‌باشد.

**جدول ۸- درآمد سالیانه (دلار)**

فروش برق	۴۸۶۷۵
فروش حرارت	۲۹۵۰۰
فروش کود	۶۰۰۰۰
درآمد کل	۱۳۸۱۷۵

#### ۵- نتیجه‌گیری

محاسبات اقتصادی برای یک نمونه از نیروگاههای بیوگاز سوز با ظرفیت ۱۰۲۲ کیلووات که بیوگاز مصرفی را از دو هاضم بی-هوازی با ظرفیت ۸۴۲۰ مترمکعبی تأمین می‌نماید، انجام گردید. میزان سرمایه‌گذاری لازم برای احداث یک موتور بیوگاز سوز با ظرفیت تولید ۴۶۶ کیلووات برق تقریباً ۲۷۰ هزار دلار برآورد شده است. براین اساس دوره بازگشت سرمایه با توجه به درآمد حاصل از فروش برق و محصولات جانبی شامل درآمد ناشی از صرفه جویی در مصرف گاز طبیعی و درآمد ناشی از فروش کود غنی شده ۴ ساله محاسبه شده است و بیان کننده به صرفه بودن سرمایه‌گذاری در این بخش در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری است. لذا نتایج محاسبات نشان می‌دهد که احداث موتور بیوگاز سوز اقتصادی است و از بازگشت سرمایه قابل قبولی برخوردار است. ضمن آنکه با افزایش ظرفیت نیروگاه به علت کاهش در هزینه سرمایه‌گذاری نسبت به تولید برق و حرارت، سود بیشتری را به همراه خواهد داشت. از طرفی اهمیت مزایای زیست محیطی این طرح تولید کود بهبود دهنده خاک (مخصوصاً با توجه به فقر عمومی خاک در کشور) و همچنین کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای چون متان، دی اکسیدکربن است، که این کاهش در تصفیه خانه کاشان معادل ۲۷۹۳۵ تن  $CO_2$  است.

بنابراین نتایج حاصله بخوبی نمایانگر ضرورت ترویج و توسعه در احداث نیروگاه‌های تولید همزمان برق و حرارت بیوگازسوز، که راهی به سوی توسعه پایدار در کشور خواهد بود، می‌باشد.

#### ۶- مراجع

[1] Chae KJ., Kang J., Estimating the energy independence of a municipal wastewater treatment plant incorporating green energy

#### ۴-۵- هزینه‌های جاری طرح

(جدول ۹) هزینه‌های جاری موتور بیوگاز سوز تصفیه خانه فاضلاب را نشان می‌دهد [۲۷].

**جدول ۹- هزینه سالیانه موتور بیوگازسوز [۲۷]**

ردیف	شرح	هزینه سالیانه (میلیون ریال)	دلار
۱	هزینه سربار	۵۰	۱۵۶۲
۲	حمل و نقل	۲۵	۷۸۱
۳	تعمیرات موتور و روغن مصرفی	۸۱۶	۲۵۵۰۰
۴	تعمیرات ساختمان	۲۵	۷۸۱
۵	بیمه حوادث	۸۹	۲۷۸۱
۶	دست مزد	۶۷۲	۲۱۰۰۰
۷	هزینه‌های پیش بینی نشده ۵٪	۸۴	۲۶۲۵
	مجموع	۱۷۶۱	۵۵۰۳۱

#### ۴-۶- ارزش فعلی خالص

یکی از روش‌های استاندارد ارزیابی طرح‌های اقتصادی ارزش فعلی خالص است [۲۸]. در این روش، جریان نقدینگی (درآمدها و هزینه‌ها) بر پایه زمان وقوع (درآمد یا هزینه) به نرخ روز تنزیل می‌شود. به این ترتیب در جریان نقدینگی، ارزش زمان انجام هزینه یا به دست آمدن درآمد نیز لحاظ می‌گردد. ارزش فعلی خالص در (جدول ۱۰) گزارش شده است. براین اساس دوره

- ۹۳/۲۷۶۱۳، شرکت آب و فاضلاب کاشان، تصفیه خانه فاضلاب شهری کاشان، ۱۳۹۴.
- [24] Zhang, H.J., Sludge treatment to increase biogas production, Trita-LWR Degree Project 10-20, 2010.
- [25] Fytli D., Zabanitout A., Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:116–140, 2008.
- [26] Driessen W., Zessen V.E., Reitsma G., Haarhuis R., Paques B.V., Sustainable Treatment Of Reject Water And Industrial Effluent By Producing Valuable By-Products, 14th European biosolids and organic Resources conference, 2011.
- [۲۷] اسماعیلی ح.، قریشی م.، اسماعیلی نیستانی ش.، رنجبر ص.، کرباسیون ن.، طراحی و بررسی اقتصادی و فنی احداث نیروگاه بیوگاز سوز یک مگاواتی در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری، همایش ملی و مهندسی آب و فاضلاب، ۱۳۹۱.
- [28] Peters M.S., Timmerhaus K.D., *Plant Design and Economics For Chemical Engineers*, 4 th edition, John Wiley and Sons, 1997.
- resources, *Energy Conversion and Management*, 75: 664–672, 2013.
- [2] Guo J., Peng Y., Peng C., Wang S., Chen Y., Huang H., Energy saving achieved by limited filamentous bulking sludge under low dissolved oxygen, *Bioresour Technol*, 101:1120–6, 2010.
- [3] Holmberg H., Ahtila P., The Thermal Analyses of a Combined Heat and Power Plant Undergoing Clausius- Rankine Cycle Based on the Theory of Effective Heat Absorbing and Heat – Emitting Temperatures, *Applied Thermal Engineering*, 70:977-987, 2014.
- [4] Chudoba P., Sardet C., Palko G., Guibelin, E., Main factors influencing anaerobic digestion of sludge and energy efficiency at several large WWTP in central Europe, *Journal of Residuals Science and Technology* 8, 89–96 , 2011.
- [5] Svardal K., Kroiss H., Energy requirements for waste water treatment, *Water Science and Technology* 64 (6), 1355–1361, 2011.
- [6] Balmer P., Hellström D., Performance indicators for wastewater treatment plants, *Water Science and Technology* 65 (7), 1304–1310, 2012.
- [7] Jenicek P., Kutil J., Benes O., Todt V., Zabransaka, J., Dohanyos M., Energy self-sufficient sewage wastewater treatment plants: is optimized anaerobic sludge digestion the key?, *Water Sci Technol*, 68:1739 – 44, 2013.
- [8] Koroneos C.J., Fokaides P.A., Christoforous, E.A., Exergy analysis of a 300 MW lignite thermoelectric power plant, *energy*, 75: 304 - 311, 2014.
- [9] Xie D., Wang Z., Jin L., Zhang Y., Energy and exergy analysis of a fuel cell based micro combined heat and power cogeneration system, *Energy Build*, 50: 266 - 72, 2012.
- [۱۰] Barelli L., Bidini G., Gallorini F., Ottaviano A., An energetic-exergetic analysis of a residential CHP system based on PEM fuel cell, *Appl Energy*, 88: 4334 - 42, 2011.
- [11] Chan Y.J., Chong M.F., Chung L.L., Hasell DG., A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater, *Chem Eng J*, 155:1–18, 2009.
- [12] Bruijstens A.J., Beuman W.P.H., Moelen M.V.D., Bleuanus S., Biogas composition and Engine Performance, Including Database and Biogas property Model, 2008.
- [13] Silvestre G., Fernandez B., Bonmati A., Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants, *Energy Conversion and Management*, 101: 255–262, 2015.
- [14] Jenicek P., Bartacek J., Kutil J., Zabranska J., and Dohanyos M., Potentials and limits of anaerobic digestion of sewage sludge: Energy self-sufficient municipal wastewater treatment plant?, *Water Science & Technology*, 66 : 1277–1281, 2012.
- [15] Chan Y.J., Chong M.F., Chung L.L., Hasell D.G., A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater, *Chem Eng J*; 155:1–18, 2009.
- [۱۶] وزارت نیرو، دفتر بهبود بهره‌وری و اقتصاد برق و انرژی راهنمای جامع تولید همزمان برق و حرارت، ۱۳۸۸.
- [17] Finsterwalder T., Rutz D., Technical Opportunities for the Utilization of Biogas in Eastern Europe, Finsterwalder Umwelttechnik Project, Germany, 2008.
- [۱۸] نصیری ج.، امکان سنجی نیروگاه بیوگازی ساوه، سومین کنفرانس بین المللی انرژی در ایران، ۲۰۰۸.
- [۱۹] یزدان داد ح.، کریمی الف.، فاتحی الف.، استفاده از انرژی نیروگاه بیوگاز مشهد در راستای حفاظت از محیط زیست، کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، ۲۰۱۱.
- [20] <http://www.sun.org.ir/projectdetail2-76-fa.html>.
- [21] Chacartegui R., Monjea B., Sánchez D., Becerra J.A., Campanari S., Molten carbonate fuel cell: Towards negative emissions in wastewater treatment CHP plants, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 19 :453–461, 2013.
- [22] 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, *international journal of hydrogen energy*, 38: 394 - 405, 2013.
- [۲۳] سلمانی ف.، سلیمی م.ر.، جاجویی مقدم س.، شرکت مهندسی مشاور طوس آب، طرح تصفیه خانه فاضلاب شهر کاشان، مطالعات امکان‌سنجی ارتقاء تصفیه خانه و مطالعات مرحله دوم تکمیل مدول اول و دوم تصفیه‌خانه،