

برآورد پتانسیل تولید بیوگاز و برق از فاضلاب شهری در کشور

مصطفی داوودی نژاد^۱، پوریا بی پروا^{۲*}، احمد اکبرپور طلوتی^۳

۱. تهران، دانشگاه تهران، دانش آموخته دانشکده مهندسی شیمی

۲. ساری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده علوم پایه

۳. تهران، دانشگاه تهران، دانش آموخته دانشکده محیط زیست

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۴/۲۳ - تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۳/۲۴)

چکیده

تولید بیوگاز رایج‌ترین شیوه تولید انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و صنعتی در دنیاست. میزان تولید متان به مقدار مواد آلی تجزیه‌پذیر در فاضلاب، دما و نوع سامانه تصفیه بستگی دارد. پارامترهای معمول برای اندازه‌گیری ترکیبات آلی فاضلاب شامل BOD یا COD نشان‌دهنده پتانسیل تولید متان هستند. به دلیل دسترسی نداشتن به اطلاعات دقیق آزمایشگاهی از واحدهای تصفیه‌خانه کشور، انجام دادن محاسبات دقیق ممکن نیست. در نتیجه، در این مقاله از مقادیر میانگین برای فاضلاب‌های تولیدی در کشور و همچنین ضرایب تقریبی استفاده شد. براساس محاسبات جمعیتی، حداکثر مقدار تولید متان از هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب تولیدی در کشور، حدود $219437/03 \text{ ton/yr}$ (بالغ بر $307/21 \text{ Mm}^3/\text{yr}$) و بیوگاز معادل $337595/43 \text{ ton/yr}$ (بالغ بر $472/63 \text{ Mm}^3/\text{yr}$) و حداکثر توان تولید برق از آن حدود $174/52 \text{ MW}$ برآورد شد. محاسبات نشان می‌دهد با تجهیز تمامی تصفیه‌خانه‌های با سامانه تصفیه لجن فعال در کشور به هاضم‌های بی‌هوازی و بهره‌برداری از آن‌ها و نصب تجهیزات نیروگاهی مورد نیاز، پتانسیل تولید برق حدود 44 MW وجود دارد. همچنین، با احتساب تصفیه‌خانه‌های دارای هاضم بی‌هوازی، توان تولید برق حدود 22 MW قابل حصول است.

واژه‌های کلیدی: بیوگاز، پتانسیل انرژی، روش IPCC، فاضلاب، هاضم.

۱. مقدمه

به یک درصد گاز سولفید هیدروژن تولید می‌شود که به جز آلوده‌سازی محیط زیست، خاصیت خوردگی شدیدی بر تأسیسات بعد از مخزن دارد. اگر از گاز مخزن هضم لجن برای تولید انرژی استفاده شود، باید گاز H_2S پیش از مصرف حذف شود. گاز متان به‌دست‌آمده از هضم لجن دارای خاصیت سوزندگی زیاد و حتی کمی بیشتر از قدرت سوزندگی گاز طبیعی شبکه‌های گاز شهری است؛ بنابراین، از این گاز در تصفیه‌خانه‌های لجن فعال برای گرمایش تصفیه‌خانه و به‌ویژه گرم کردن منبع‌های هضم لجن استفاده می‌شود. در تصفیه‌خانه‌های بزرگ، از این گاز برای تولید برق استفاده می‌شود. لجنی که مرحله هضم متانی آن انجام گرفته باشد،

تولید بیوگاز در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، از هضم بی‌هوازی لجن در هاضم‌ها صورت می‌پذیرد. لجن پیش از وارد شدن به منبع‌های هضم لجن نزدیک به ۶۰ تا ۸۰ درصد مواد آلی تجزیه‌پذیر دارد. لجن تازه از نظر حجمی نزدیک به یک درصد کل فاضلاب را شامل می‌شود، اما تصفیه آن بسیار پرهزینه و پیچیده است. هزینه تأسیسات هضم لجن گاهی نزدیک به نصف تمام هزینه یک تصفیه‌خانه را دربر می‌گیرد [۱]. نسبت گاز متان به‌دست‌آمده از هضم لجن فاضلاب شهری، ۶۵ تا ۷۰ درصد و گاز کربنیک ۳۰ تا ۳۵ درصد کل گاز تولید شده است. همراه گازهای تولید شده در مخزن‌های هضم لجن نزدیک

تولید توان الکتریکی استفاده شود، قابلیت تولید MJ_h انرژی الکتریسیته به ازای هر متر مکعب بیوگاز تولیدی وجود دارد و در صورت استفاده از سامانه تولید همزمان برق و حرارت، همین مقدار انرژی حرارتی نیز قابل بازیافت است [۲، ۳].

تولید بیوگاز رایج‌ترین شیوه تولید انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و صنعتی در دنیا است. جدول ۱ برق تولید شده از بیوگاز فاضلاب در کشورهای عضو سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (OECD) را در سال ۲۰۰۹ نشان می‌دهد. آمریکا، آلمان و انگلیس به ترتیب با توان نیروگاهی ۲۷۴، ۱۲۰/۷ و ۷۲/۸ MW دارای بیشترین میزان تولید برق از این منبع هستند [۴].

دارای رنگ قهوه‌ای مایل به سیاه است و بویی شبیه بوی خاک مرطوب می‌دهد، به خوبی آب خود را از دست می‌دهد و حجم آن به صورت چشمگیری کم می‌شود و خاصیت چسبندگی آن ناچیز و مقدار موجودات زنده در آن کم است [۲].

ارزش حرارتی آن معادل ۲۰ MJ/m^۳ برآورد می‌شود. اگر بیوگاز سوزانده شود، ممکن است حرارت مورد نیاز هاضم‌های لجن را تأمین کند. با در نظر گرفتن متوسط ۶۰ درصدی محتوی متان در بیوگاز، می‌توان گفت حدود ۶۰ درصد در میزان مصرف گاز طبیعی صرفه جویی می‌شود. همچنین، بازدهی الکتریکی معمول موتور- ژنراتورهای بیوگاز حدود ۴۰ درصد است؛ بنابراین، اگر بیوگاز تولیدی در موتور- ژنراتور برای

جدول ۱. تولید برق از بیوگاز فاضلاب در کشورهای عضو سازمان همکاری اقتصادی و توسعه در سال ۲۰۰۹ [۴]

کشور	کل تولید برق GWh	برق تولیدی از بیوگاز فاضلاب GWh	ظرفیت نیروگاه بیوگاز فاضلاب MW	درصد برق تولیدی از بیوگاز فاضلاب
آلمان	۵۴۷۰۰۰	۱۰۵۷	۱۲۰/۷	۰/۱۹
لوکزامبورگ	۶۵۰۰	۶	۰/۷	۰/۰۹
انگلیس	۳۴۵۰۰۰	۶۳۸	۷۲/۸	۰/۱۸
هلند	۱۲۴۰۰۰	۱۵۰	۱۷/۱	۰/۱۲
جمهوری چک	۶۲۰۰۰	۸۳	۹/۵	۰/۱۳
ایالات متحده	۳۸۷۳۰۰۰	۲۴۰۰	۲۷۴/۰	۰/۰۶
دانمارک	۳۴۳۰۰	۳۸	۴/۳	۰/۱۱
استرالیا	۲۲۲۰۰۰	۱۲۵	۱۴/۳	۰/۰۶
اتریش	۶۸۳۰۰	۳۹	۴/۵	۰/۰۶
لهستان	۱۲۹۳۰۰	۱۲۳	۱۴/۰	۰/۱۰
سوئد	۱۳۴۵۰۰	۱۹	۲/۲	۰/۰۱
فرانسه	۴۴۷۰۰۰	۴۵	۵/۱	۰/۰۱
ایتالیا	۳۱۵۰۰۰	۲۰	۲/۳	۰/۰۱

۲. مواد و روش‌ها

برای برآورد پتانسیل تولید بیوگاز از فاضلاب شهری از روش IPCC استفاده شد. این روش ممکن است با کمی تغییر به عنوان راهکاری بین‌المللی برای محاسبه انرژی قابل بازیافت از این گاز از منابع مختلف مثل زباله، فاضلاب و فضولات دامی و... به کار گرفته شود. اصول محاسبه متان قابل استحصال از فاضلاب شهری براساس میزان BOD سرانه و ضریب انتشار است [۵]؛ بنابراین، با توجه به این روش، می‌توان گفت میزان انتشار متان، تابعی از ضایعات آلی تولید شده است و ضریب انتشار نشان می‌دهد مقدار مشخصی از این ضایعات چقدر متان تولید می‌کند. گام‌های محاسبه متان قابل بازیابی از فاضلاب خانگی براساس متدولوژی IPCC به ترتیب زیر است [۷]:

میزان تولید متان به مقدار مواد آلی تجزیه پذیر در فاضلاب، دما و نوع سامانه تصفیه بستگی دارد. عامل اصلی در تعیین میزان پتانسیل تولید متان از فاضلاب، مقدار مواد آلی تجزیه پذیر در فاضلاب است. پارامترهای معمول برای اندازه گیری ترکیبات آلی فاضلاب شامل BOD یا COD نشان دهنده پتانسیل تولید متان هستند [۵]. جدول ۲ بازده تولید بیوگاز از پسماندهای مختلف را نشان می‌دهد. به دلیل دسترسی نداشتن به اطلاعات دقیق آزمایشگاهی از واحدهای تصفیه خانه شهری کشور، انجام دادن محاسبات دقیق ممکن نیست، در نتیجه در این مقاله از مقادیر میانگین برای فاضلاب‌های تولیدی در کشور و همچنین ضرایب تقریبی استفاده شد.

جدول ۲. بازده تولید انرژی از بیوگاز پسماندهای مختلف [۶]

سوستر	گاز تولیدی به ازای ماده خشک آلی، m ^۳ /t ODS	گاز تولیدی به ازای کل ماده اولیه، m ^۳ /t FM	انرژی برق تولیدی از بیوگاز حاوی ۵۵ درصد متان در سامانه CHP با بازده ۳۵ درصد، kWh/t FM
کود حیوانی	۳۰۰	۶۰/۰	۱۲۲/۵
کاه و کلش برنج	۳۵۰	۲۶۷/۸	۵۴۶/۷
پسماند میوه جات و سبزی‌ها	۵۵۰	۷۴/۳	۱۵۱/۶
آب پنیر	۷۵۰	۳۳/۸	۶۸/۹
لجن فاضلاب	۴۹۰	۴۷/۰	۹۶/۰
پسماند شهری	۵۸۰	۱۰۱/۵	۲۰۷/۲

مرحله ۱. استفاده از رابطه ۱ برای برآورد مجموع کربن آلی تجزیه پذیر در فاضلاب.

$$TOW = ۳۶۵ \times I \times ۰/۰۰۱ \times BOD \times L \quad (۱)$$

TOW = مجموع مواد آلی در فاضلاب در سال آماری بر حسب kg BOD/yr

$$L = \text{ظرفیت تصفیه خانه فاضلاب (m}^3\text{/yr)}$$

BOD = میانگین BOD در فاضلاب شهری کشور بر حسب mg/L

$$۰/۰۰۱ = \text{ضریب تبدیل g BOD/kg BOD}$$

I = ضریب تصحیح برای BOD اضافی وارد شده به مجاری جمع آوری فاضلاب (در صورتی که پساب‌های صنعتی به سامانه جمع آوری فاضلاب شهری منتقل شود. پیش فرض این ضریب ۱/۲۵ و در غیر این صورت ۱ است).

مرحله ۲. انتخاب شیوه و سامانه تصفیه و کاربرد رابطه ۲ برای به دست آوردن ضریب انتشار.

$$EF_j = MCF_j \times B. \quad (۲)$$

EF_j = ضریب انتشار

L = نوع شیوه یا سامانه تصفیه و تخلیه فاضلاب

B = حداکثر ظرفیت تولید متان بر حسب kg CH_۴/kg BOD

MCF_j = ضریب تصحیح متان (جدول ۲).

تولید هر mole متان معادل ۶۴ g BOD است. در شرایط استاندارد، هر mole متان، ۲۲/۴ lit حجم دارد. بر این اساس، هر g BOD در شرایط استاندارد، ۰/۳۵ lit متان تولید می کند [۸]. در نتیجه، به ازای هر g BOD ۶۴ g موجود در فاضلاب، ۱۶ متان تولید می شود. از این رابطه، مقدار ضریب B برای kg CH_۴/kg BOD ۰/۲۵ به دست می آید.

مرحله ۳. استفاده از رابطه ۳ برای برآورد میزان انتشار متان. این رابطه برای لجن قابل برداشت یا متان بازیابی شده تنظیم می شود و برای هر شیوه یا سامانه، نتایج با هم جمع می شوند.

$$\text{kg CH}_4\text{/yr} = TOW \times EF_j \quad (۳)$$

با توجه به رابطه بالا، می توان میزان متان قابل استحصال را تابعی از جمعیت تحت پوشش هر واحد تصفیه خانه و سامانه فاضلاب آن واحد دانست؛ بنابراین، برای انجام دادن برآوردهای اولیه نیز می توان از آمارهای مربوط به جمعیت و فرایند واحدهای تصفیه خانه فاضلاب ارائه شده توسط شرکت آب و فاضلاب استفاده کرد.

سه دسته پتانسیل تولید انرژی در این مقاله محاسبه شد:

- پتانسیل تئوری: فقط براساس جمعیت استان‌ها برآورد می شود و پتانسیلی است که فعلاً در عمل قابل دستیابی نیست، ولی ممکن است روشنگر توان بالقوه تولید انرژی از فاضلاب باشد.
- پتانسیل فنی: این پتانسیل در واقع نشان دهنده انرژی است که با توجه به جمعیت تحت پوشش فاضلاب شهری، فرایند تصفیه فاضلاب و صرف نظر از بودن یا نبودن فناوری‌های تبدیل انرژی برآورد شد.
- پتانسیل کنونی: از آنجاکه برخی از واحدهای کشور دارای هاضم‌های بی‌هوازی برای تثبیت لجن هستند، می توان با راهبری صحیح هاضم‌ها و ایجاد امکانات تولید برق به سادگی بخشی از انرژی مورد نیاز این واحدها را تأمین کرد؛ بنابراین، پتانسیل تولید انرژی در حال حاضر محدود به این واحدهاست که مدل ویژه آن‌ها با اعمال ضرایب متفاوت ایجاد شد.

۳۰۷/۲۱) و بیوگاز معادل ۳۳۷۵۹۵/۴۳ ton/yr (بالغ بر ۴۷۲/۶۳ Mm^۳/yr) و حداکثر توان تولید برق از آن حدود ۱۷۴/۵۲ MW برآورد شد.

برای به دست آوردن پتانسیل فنی، واحدهای تصفیه‌خانه با سامانه تصفیه لجن فعال (متعارف، هوادهی گسترده و...) در نظر گرفته شد که سامانه بازچرخش و جمع‌آوری لجن دارند و محاسبات براساس ظرفیت اسمی تصفیه‌خانه‌ها (در حال اجرا و بهره‌برداری) و با فرض مقدار متوسط ۱۷۵ mg/l برای BOD فاضلاب ورودی انجام گرفت. نتایج این محاسبات نشان‌دهنده حداکثر ظرفیت کنونی تصفیه‌خانه‌های با سامانه لجن فعال کشور برای تولید برق از بیوگاز در صورت تجهیز این تصفیه‌خانه‌ها به هاضم‌های بی‌هوازی است. نتایج در جدول ۵ نشان داده می‌شود. محاسبات نشان می‌دهد با تجهیز تمام تصفیه‌خانه‌های با سامانه تصفیه لجن فعال در کشور به هاضم‌های بی‌هوازی و بهره‌برداری از آن‌ها و نصب تجهیزات نیروگاهی مورد نیاز، پتانسیل تولید برق حدود ۴۴ MW وجود دارد.

برای برآورد پتانسیل کنونی تولید بیوگاز در کشور، تصفیه‌خانه‌هایی در نظر گرفته شدند که دارای هاضم‌های بی‌هوازی برای تثبیت لجن هستند (در حال بهره‌برداری و اجرا). از بین تمام تصفیه‌خانه‌های شهری کشور که از روش لجن فعال برای تصفیه فاضلاب استفاده می‌کنند، تنها تصفیه‌خانه‌های جنوب تهران، شمال اصفهان، جنوب اصفهان، شاهین‌شهر، تبریز و غرب اهواز از هاضم‌های بی‌هوازی برای تثبیت لجن استفاده می‌کنند. همچنین، تصفیه‌خانه‌های کرمانشاه، بندرعباس و شیراز دارای هاضم بی‌هوازی هستند، ولی در حال حاضر از هاضم‌ها بهره‌برداری نمی‌شود. نتایج محاسبات در جدول ۶ نشان داده می‌شود و بیانگر آن است که با بهره‌برداری کامل از هاضم‌های این تصفیه‌خانه‌ها و نصب تجهیزات نیروگاهی مورد نیاز، توان تولید برق حدود ۲۲/۲۶ MW قابل حصول است.

در حال حاضر، در تعداد کمی از تصفیه‌خانه‌های شهری کشور از هاضم‌های بی‌هوازی برای تولید بیوگاز بهره‌برداری می‌شود. در تصفیه‌خانه فاضلاب تبریز، بخشی از بیوگاز تولیدی در هاضم‌ها، پس از تصفیه و خالص‌سازی برای گرمایش مخازن هاضم استفاده می‌شود و مازاد آن توسط مشعل گاز سوزانده می‌شود، در حالی که مصرف برق فاز اول این تصفیه‌خانه بالغ بر ۴ MW است. در تصفیه‌خانه غرب اهواز، گاز حاصل از عمل هضم در چهار هاضم بی‌هوازی ۴۳۵۰ m^۳، در مخزن گازی به حجم ۲۵۰ m^۳ ذخیره و گاز مازاد توسط دو دستگاه مشعل سوزانده می‌شود. تصفیه‌خانه فاضلاب شاهین‌شهر نیز از

در این برآوردها، فرض شد بیوگاز در هاضم‌های بی‌هوازی لجن تولید می‌شود و در یک سامانه CHP به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. ضریب MCF مطابق جدول ۳ معادل ۰/۸ قرار داده می‌شود.

جدول ۳. ضرایب MCF در دستورالعمل IPCC [۷]

MCF		شیوه یا سامانه تصفیه و تخلیه فاضلاب
دامنه	توصیه شده	
۰ - ۰/۱	۰	تصفیه‌خانه مجتمع و تصفیه‌خانه هوازی
۰/۲ - ۰/۴	۰/۳	تصفیه‌خانه مجتمع و تصفیه هوازی
۰/۸ - ۱	۰/۸	هاضم بی‌هوازی لجن
۰ - ۰/۳	۰/۲	لاگون کم عمق بی‌هوازی
۰/۸ - ۱	۰/۸	راکتور بی‌هوازی
۰/۸ - ۱	۰/۸	لاگون عمیق بی‌هوازی
۰/۵	۰/۵	سامانه سپتیک

برای محاسبه مقدار بیوگاز تولیدی، فرض می‌شود بیوگاز حاوی ۶۵ درصد متان باشد. همچنین، برای محاسبه پتانسیل تولید انرژی، از ارزش حرارتی متان (۵۰/۱۶۳ MJ/kg) استفاده می‌شود. تبدیل انرژی برحسب MJ/kWh از رابطه kWh = MJ/۳/۶ انجام می‌گیرد. ظرفیت یا توان تولید برق از رابطه ۴ به دست می‌آید [۹]:

$$M = \frac{E \times \eta}{8760 \cdot h} \quad (۴)$$

که در آن، M ظرفیت یا توان تولید برق، E پتانسیل تولید برق MWh، η کارایی خالص است که در این مدل، با توجه به بازده ژنراتورهای بیوگازسوز، ۰/۴۰ فرض شد. h ضریب ظرفیت (درصدی از ساعات سال که سامانه دارای کارکرد بهینه است و در دست تعمیر و به‌روزرسانی نیست) است که در این مدل ۰/۸ فرض شد.

۳. نتایج و بحث

نتایج محاسبات انجام‌گرفته به تفکیک استان‌های کشور در جدول ۴ نشان داده می‌شود. با توجه به اینکه محاسبات براساس جمعیت هر استان انجام گرفت، استان‌های پرجمعیت مانند تهران، اصفهان، خراسان رضوی، البرز، خوزستان، فارس و آذربایجان شرقی دارای بیشترین پتانسیل تولید برق از بیوگاز فاضلاب شهری هستند. براساس محاسبات حداکثر، مقدار تولید متان از هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب تولیدی در کشور، حدود ۲۱۹۴۳۷/۰۳ ton/yr (بالغ بر ۲۱۹۴۳۷/۰۳ M m^۳/yr)

در این تصفیه‌خانه حدود $450 \text{ m}^3/\text{hr}$ بیوگاز تولید می‌شود که پتانسیل تولید 1 MW و 1 MW حرارت را دارد. از سال ۱۳۹۰، اقداماتی برای احداث نیروگاه در این تصفیه‌خانه انجام گرفت و قراردادی ۲۰ میلیارد ریالی نیز منعقد شد، ولی تاکنون اجرایی نشد [۲].

هاضم‌های بی‌هوازی بهره می‌برد که خروجی آن گازی با ۶۵-۸۰ درصد متان است. در تصفیه‌خانه جنوب اصفهان نیز از هاضم‌های لجن، استحصال بیوگاز انجام می‌گیرد که آن هم در مشعل تصفیه‌خانه سوزانده می‌شود [۵]. تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان از روش لجن فعال برای تصفیه فاضلاب استفاده می‌کند.

جدول ۴. پتانسیل تئوری تولید انرژی از بیوگاز فاضلاب شهری در کشور

استان	جمعیت (نفر)	BOD تولیدی (ton BOD/yr)	متان قابل استحصال (ton CH ₄ /yr)	ارزش حرارتی متان تولیدی (GJ/yr)	تولید برق (MWh/yr)	توان تولید برق (MW)
آذربایجان شرقی	۳۷۲۴۶۲۰	۵۴۳۷۹/۴۵	۱۰۸۷۵/۸۹	۵۴۵۵۶۷/۲۹	۷۵۷۷۳/۲۳	۸/۶۵
آذربایجان غربی	۳۰۸۰۵۷۶	۴۴۹۷۶/۴۱	۸۹۹۵/۲۸	۴۵۱۲۳/۳۳	۶۲۶۷۰/۸۸	۷/۱۵
اردبیل	۱۲۴۸۴۸۸	۱۸۲۲۷/۹۲	۳۶۴۵/۵۸	۱۸۲۸۱۳/۴۷	۲۵۳۹۹/۰۹	۲/۹۰
اصفهان	۴۸۷۹۳۱۲	۷۱۲۳۷/۹۶	۱۴۲۴۷/۵۹	۷۱۴۷۰/۹۱	۹۹۲۶۴/۱۵	۱۱/۳۳
البرز	۲۴۱۲۵۱۳	۳۵۲۲۲/۶۹	۷۰۴۴/۵۴	۳۵۳۳۷۵/۱۶	۴۹۰۷۹/۸۸	۵/۶۰
ایلام	۵۵۷۵۹۹	۸۱۴۰/۹۵	۱۶۲۸/۱۹	۸۱۶۷۴/۸۵	۱۱۳۴۴/۷۳	۱/۲۹
بوشهر	۱۰۳۲۹۴۹	۱۵۰۸۱/۰۶	۳۰۱۶/۲۱	۱۵۱۳۰۲/۲۰	۲۱۰۱۴/۱۹	۲/۴۰
تهران	۱۲۱۸۳۳۹۱	۱۷۷۸۷۷/۵۱	۳۵۵۷۵/۵۰	۱۷۸۴۵۷۳/۸۹	۲۴۷۸۵۷/۴۹	۲۸/۲۹
چهارمحال و بختیاری	۸۹۵۲۶۳	۱۳۷۰/۸۴	۲۶۱۴/۱۷	۱۳۱۱۳۴/۵۰	۱۸۲۱۳/۱۳	۲/۰۸
خراسان شمالی	۸۶۷۷۲۷	۱۲۶۶۸/۸۱	۲۵۳۳/۷۶	۱۲۷۱۰۱/۱۵	۱۷۶۵۲/۹۴	۲/۰۲
خراسان جنوبی	۶۶۲۵۳۴	۹۶۷۳/۰۰	۱۹۳۴/۶۰	۹۷۰۴۵/۳۰	۱۳۴۷۸/۵۱	۱/۵۴
خراسان رضوی	۵۹۹۴۴۰۲	۸۷۵۱۸/۲۷	۱۷۵۰۳/۶۵	۸۷۸۰۳۰۵/۷۹	۱۲۱۹۴۹/۴۱	۱۳/۹۲
خوزستان	۴۵۳۱۷۲۰	۶۶۱۶۳/۱۱	۱۳۲۳۲/۶۲	۶۶۳۷۸۸/۰۴	۹۲۱۹۲/۷۸	۱۰/۵۲
زنجان	۱۰۱۵۷۳۴	۱۴۸۲۹/۷۱	۲۹۶۵/۹۴	۱۴۸۷۸۰/۶۱	۲۰۶۶۳/۹۷	۲/۳۶
سمنان	۶۳۱۲۱۸	۹۲۱۵/۷۸	۱۸۴۳/۱۶	۹۲۴۵۸/۲۶	۱۲۸۴۱/۴۳	۱/۴۷
سیستان و بلوچستان	۲۵۳۴۳۲۷	۳۷۰۰۱/۱۷	۷۴۰۰/۲۳	۳۷۱۲۱۷/۹۸	۵۱۵۵۸/۰۵	۵/۸۹
فارس	۴۵۹۶۶۵۸	۶۷۱۱۱/۲۱	۱۳۴۲۲/۲۴	۶۷۳۲۹۹/۸۹	۹۳۵۱۳/۸۷	۱۰/۶۸
قزوین	۱۲۰۱۵۶۵	۱۷۵۴۲/۸۵	۳۵۰۸/۵۷	۱۷۶۰۰/۳۹	۲۴۴۴۴/۵۰	۲/۷۹
قم	۱۱۵۱۶۷۲	۱۶۸۱۴/۴۱	۳۳۶۲/۸۸	۱۶۸۶۹۲/۲۶	۲۳۴۲۹/۴۸	۲/۶۷
کردستان	۱۴۹۳۶۴۵	۲۱۸۰۷/۲۲	۴۳۶۱/۴۴	۲۱۸۸۱۳/۰۹	۳۰۳۸۶/۵۴	۳/۴۷
کرمان	۲۹۳۸۹۸۸	۴۲۹۰۹/۲۲	۸۵۸۱/۸۴	۴۳۰۴۹۱/۰۹	۵۹۷۹۰/۴۳	۶/۸۳
کرمانشاه	۱۹۴۵۲۲۷	۲۸۴۰۰/۳۱	۵۶۸۰/۰۶	۲۸۴۹۲۸/۹۹	۳۹۵۷۳/۴۷	۴/۵۲
کهگیلویه و بویراحمد	۶۵۸۶۲۹	۹۶۱۵/۹۸	۱۹۲۳/۲۰	۹۶۴۷۳/۳۲	۱۳۳۹۹/۰۷	۱/۵۳
گلستان	۱۷۷۷۰۱۴	۲۵۹۴۴/۴۰	۵۱۸۸/۸۸	۲۶۰۲۸۹/۸۳	۳۶۱۵۱/۳۷	۴/۱۳
گیلان	۲۴۸۰۸۷۴	۳۶۲۲۰/۷۶	۷۲۴۴/۱۵	۳۶۳۳۸۸/۴۰	۵۰۴۷۰/۶۱	۵/۷۶
لرستان	۱۷۵۴۲۴۳	۲۵۶۱۱/۹۵	۵۱۲۲/۳۹	۲۵۶۹۵۴/۴۳	۳۵۶۸۸/۱۱	۴/۰۷
مازندران	۳۰۷۳۹۴۳	۴۴۸۷۹/۵۷	۸۹۷۵/۹۱	۴۵۰۲۵۸/۷۵	۶۲۵۳۵/۹۴	۷/۱۴
مرکزی	۱۴۱۳۹۵۹	۲۰۶۴۳/۸۰	۴۱۲۸/۷۶	۲۰۷۱۱۱/۰۰	۲۸۷۶۵/۴۲	۳/۲۸
هرمزگان	۱۵۷۸۱۸۳	۲۳۰۴۱/۴۷	۴۶۰۸/۲۹	۲۳۱۱۶۵/۸۷	۳۲۱۰۶/۳۷	۳/۶۷
همدان	۱۷۵۸۲۶۸	۲۵۶۷۰/۷۱	۵۱۳۴/۱۴	۲۵۷۵۴۳/۹۹	۳۵۷۷۰/۰۰	۴/۰۸
یزد	۱۰۷۴۴۲۸	۱۵۶۸۶/۶۵	۳۱۳۷/۳۳	۱۵۷۳۷۷/۸۷	۲۱۸۵۸/۰۴	۲/۵۰
کل کشور	۷۵۱۴۹۶۶۹	۱۰۹۷۱۸۵/۱۷	۲۱۹۴۳۷/۰۳	۱۱۰۰۷۶۱۹/۹۱	۱۵۲۸۸۳۶/۱۰	۱۷۴/۵۲

جدول ۵. پتانسیل فنی تولید انرژی از بیوگاز فاضلاب شهری در کشور

استان	ظرفیت اسمی تصفیه‌خانه‌های لجن فعال (km ³ /yr)	BOD ورودی (ton BOD/yr)	متان قابل استحصال (ton CH ₄ /yr)	ارزش حرارتی متان تولیدی (GJ/yr)	تولید برق (MWh/yr)	توان تولید برق (MW)
آذربایجان شرقی	۹۹۴۰۴	۱۷۳۹۵/۷۰	۳۴۷۹/۱۴	۱۷۴۵۲۴/۱۰	۲۴۲۳۹/۴۶	۲/۷۷
آذربایجان غربی	۳۸۲۱۵	۶۶۸۷/۶۳	۱۳۳۷/۵۳	۶۷۰۹۴/۲۷	۹۳۱۸/۶۵	۱/۰۶
اردبیل	۱۶۰۴۰	۲۸۰۷/۰۰	۵۶۱/۴۰	۲۸۱۶۱/۵۱	۳۹۱۱/۳۲	۰/۴۵
اصفهان	۱۷۲۲۸۹	۳۰۱۵۰/۵۶	۶۰۳۰/۱۲	۳۰۲۴۸۸/۶۶	۴۲۰۱۲/۳۱	۴/۸۰
ایلام	-	-	-	-	-	-
بوشهر	۱۰۲۰۰	۱۷۸۵/۰۰	۳۵۷/۰۰	۱۷۹۰۸/۱۹	۲۴۸۷/۲۵	۰/۲۸
تهران و البرز	۴۶۱۱۲۳	۸۰۶۹۶/۵۳	۱۶۱۳۹/۳۱	۸۰۹۵۹۵/۹۶	۱۱۲۴۴۳/۸۸	۱۲/۸۴
چهارمحال و بختیاری	۴۴۲۸۸	۷۷۵۰/۴۰	۱۵۵۰/۰۸	۷۷۷۵۶/۶۶	۱۰۷۹۹/۵۴	۱/۲۳
خراسان شمالی	۴۳۸۰	۷۶۶/۵۰	۱۵۳/۳۰	۷۶۸۹/۹۹	۱۰۶۸/۰۵	۰/۱۲
خراسان جنوبی	-	-	-	-	-	-
خراسان رضوی	۷۱۱۰۵	۱۲۴۴۳/۳۸	۲۴۸۸/۶۸	۱۲۴۸۳۹/۴۰	۱۷۳۳۸/۸۱	۱/۹۸
خوزستان	۵۹۸۶۹	۱۰۴۷۷/۰۸	۲۰۹۵/۴۲	۱۰۵۱۱۲/۳۰	۱۴۵۹۸/۹۳	۱/۶۷
زنجان	۱۰۷۱۳	۱۸۷۴/۷۸	۳۷۴/۹۶	۱۸۸۰۸/۸۷	۲۶۱۲/۳۴	۰/۱۵
سمنان	۱۱۶۸	۲۰۴/۴۰	۴۰/۸۸	۲۰۵۰/۶۶	۲۸۴/۸۱	۰/۰۳
سیستان و بلوچستان	۳۵۵۸۸	۶۲۲۷/۹۰	۱۲۴۵/۵۸	۶۲۴۸۲/۰۳	۸۶۷۸/۰۶	۰/۹۹
فارس	۷۰۰۶۹	۱۲۲۶۲/۰۸	۲۴۵۲/۴۲	۱۲۳۰۲۰/۴۹	۱۷۰۸۶/۱۸	۱/۹۵
قزوین	۴۰۷۷۹	۷۱۳۶/۳۳	۱۴۲۷/۲۷	۷۱۵۹۵/۸۹	۹۹۴۳/۸۷	۱/۱۴
قم	۱۸۲۵۰	۳۱۹۳/۷۵	۶۳۸/۷۵	۳۲۰۴۱/۶۱	۴۴۵۰/۲۲	۰/۵۱
کردستان	۶۲۷۷۶	۱۰۹۸۵/۸۰	۲۱۹۷/۱۶	۱۱۰۲۱۶/۱۴	۱۵۳۰۷/۸۰	۱/۷۵
کرمان	۵۵۸۴	۹۷۷/۲۰	۱۹۵/۴۴	۹۸۰۳/۸۶	۱۳۶۱/۶۵	۰/۱۶
کرمانشاه	۹۸۴۵۷	۱۷۲۲۹/۹۸	۳۴۴۶/۰۰	۱۷۲۸۶۱/۴۵	۲۴۰۰۸/۵۳	۲/۷۴
کهگیلویه و بویراحمد	۲۹۹۳	۵۲۳/۷۸	۱۰۴/۷۶	۵۲۵۴/۸۳	۷۲۹/۸۴	۰/۰۸
گلستان	۱۲۴۴۷	۲۱۷۸/۲۳	۴۳۵/۶۵	۲۱۸۵۳/۲۶	۳۰۳۵/۱۸	۰/۳۵
گیلان	۴۴۱۶۵	۷۷۲۸/۸۸	۱۵۴۵/۷۸	۷۵۴۰/۷۱	۱۰۷۶۹/۵۴	۱/۲۳
لرستان	۹۶۷۲	۱۶۹۲/۶۰	۳۳۸/۵۲	۱۶۹۸۱/۱۸	۲۳۵۸/۵۰	۰/۲۷
مازندران	۴۱۵۸۳	۷۲۷۷/۰۳	۱۴۵۵/۴۱	۷۳۰۰۷/۴۸	۱۰۱۳۹/۹۳	۱/۱۶
مرکزی	۳۶۸۸۶	۶۴۵۵/۰۵	۱۲۹۱/۰۱	۶۴۷۶۰/۹۳	۸۹۹۴/۵۸	۱/۰۳
هرمزگان	۵۳۲۷۷	۹۳۲۳/۴۸	۱۸۶۴/۷۰	۹۳۵۳۸/۷۰	۱۲۹۹۱/۴۹	۱/۴۸
همدان	۴۷۰۶۶	۸۲۳۶/۵۵	۱۶۴۷/۳۱	۸۲۶۳۴/۰۱	۱۱۴۷۶/۹۵	۱/۳۱
یزد	۱۱۶۶۲	۲۰۴۰/۸۵	۴۰۸/۱۷	۲۰۴۷۵/۰۳	۲۸۴۳/۷۵	۰/۳۲
کل کشور	۲۳۸۸۲۳۷	۲۷۶۵۰۸/۴۰	۵۵۳۰۱/۶۸	۲۷۷۴۰۹۸/۱۷	۳۸۵۲۹۱/۴۱	۴۳/۹۸

جدول ۶. پتانسیل کنونی تولید انرژی از بیوگاز فاضلاب شهری در کشور

توان تولید برق MW	تولید برق MWh/yr	ارزش حرارتی متان تولیدی GJ/yr	متان قابل استحصال (ton CH ₄ /yr)	BOD ورودی (ton BOD/yr)	ظرفیت اسمی (km ³ /yr)	تصفیه‌خانه
۱۱/۴۱	۹۹۹۶۹/۸۴	۷۱۹۷۸۲/۸۷	۱۴۳۴/۸۸	۷۱۷۴۴/۴۰	۴۰۹۹۶۸	جنوب تهران
۲/۵۴	۲۲۲۵۱/۱۲	۱۶۰۲۰۸/۰۸	۳۱۹۳/۷۵	۱۵۹۶۸/۷۵	۹۱۲۵۰	شمال اصفهان
۰/۶۹	۶۰۵۲/۳۱	۴۳۵۷۶/۶۰	۸۶۸/۷۰	۴۳۴۳/۵۰	۲۴۸۲۰	شاهین‌شهر
۱/۳۲	۱۱۵۳۴/۹۸	۸۳۰۵۱/۸۷	۱۶۵۵/۶۴	۸۲۷۸/۲۰	۴۷۳۰۴	تبریز
۰/۵۳	۴۶۳۰/۴۳	۳۳۳۳۹/۰۸	۶۶۴/۶۲	۳۳۲۳/۰۸	۱۸۹۸۹	غرب اهواز
۲/۲۸	۱۹۹۷۱/۱۴	۱۴۳۷۹۲/۲۴	۲۸۶۶/۵۰	۱۴۳۳۳/۵۰	۸۱۹۰۰	کرمانشاه
۱/۱۹	۱۰۴۵۸/۳۹	۷۵۳۰۰/۴۳	۱۵۰۱/۱۲	۷۵۰۵/۵۸	۴۲۸۸۹	بندرعباس
۰/۸۲	۷۲۱۷/۹۰	۵۱۹۶۸/۸۷	۱۰۳۶	۵۱۸۰	۲۹۶۰۰	شیراز
۲۲/۲۶	۱۹۴۹۹/۷۷	۱۴۰۳۹۴/۷۳	۲۷۹۸۷/۵۸	۱۳۹۹۳۷/۸۸	۷۹۹۶۴۵	جمع کل

تمامی مدول‌های هشت‌گانه این تصفیه‌خانه، تولید روزانه m^3 ۴۵۰۰۰ بیوگاز پیش‌بینی شد.

با توجه به تقاضای بالای تصفیه‌خانه‌های کشور می‌توان از انرژی تولیدشده توسط خود واحد به‌عنوان منبع مهمی برای مصرف برق واحد بهره برد یا در ساعاتی که تولید برق در واحد از مصرف برق بیشتر است، با تزریق برق تجدیدپذیر به شبکه و فروش آن به شبکه درآمد ایجاد کرد. طرح‌های تصفیه فاضلاب که به روش لجن فعال صورت می‌پذیرد از مواردی هستند که به‌دلیل فرایند تصفیه بی‌هوازی، تولید و انتشار گاز متان را به‌همراه دارند که از گازهای گلخانه‌ای است. در نتیجه، با روند کنونی پیشبرد سازوکار توسعه پاک قرارداد کیوتو در کشورهای ضمیمه I (کشورهای درحال توسعه)، می‌توان به دریافت منابع مالی خارجی و انتقال فناوری برتر در این زمینه امیدهای زیادی داشت [۱۰].

در تصفیه‌خانه جنوب تهران نیز چهار دستگاه ژنراتور با مجموع توان تولیدی $4/8$ MW برق برای مدول‌های ۱ تا ۴ اجرا شد که سوخت آن از بیوگاز تولیدی در هاضم‌های بی‌هوازی تأمین می‌شود و علاوه بر تأمین برق مورد نیاز تأسیسات تصفیه، سالانه مقداری از برق تولیدی را نیز به شبکه سراسری تزریق می‌کند. چهار مدول اول این تصفیه‌خانه ممکن است پذیرای m^3/d ۴۵۰۰۰۰ در روز (معادل m^3/yr ۱۶۴۲۵۰) فاضلاب باشد که این میزان حدود ۴۰ درصد کل ظرفیت اسمی پیش‌بینی‌شده برای تصفیه‌خانه است [۱۰]. در نتیجه، با توجه به اینکه کل تولید برق برآوردشده براساس ظرفیت اسمی تصفیه‌خانه، حدود $11/4$ MW است، ظرفیت تولید برق برای چهار مدول راه‌اندازی‌شده طبق محاسبات حدود $4/56$ MW می‌شود که نزدیک به ظرفیت تولید برق این تصفیه‌خانه (MW ۴/۵-۴/۸) است و صحت محاسبات را تأیید می‌کند. با تکمیل

مراجع

- [۱]. بدلیانس قلی‌کندی، گ.، کاشی‌تراش اصفهانی، ز. (۱۳۹۱). "بررسی و ارزیابی لجن فاضلاب، به‌عنوان منبعی از توده زنده (بايومس) برای تولید انرژی"، اولین همایش حفاظت و برنامه‌ریزی محیط زیست، تهران.
- [۲]. درخشان‌فر، ح.، قانعی، م.، حسینی، ح.، شیرینی، م. (۱۳۹۰). "امکان‌سنجی استحصال و تصفیه بیوگاز تصفیه‌خانه فاضلاب اصفهان جهت استفاده در سامانه تولید هم‌زمان برق و حرارت"، دومین همایش بیوانرژی ایران (بیوماس و بیوگاز)، تهران.
- [۳]. علی‌قارداشی، ا.، عدل، م. (۱۳۸۰). "بیوگاز در ایران (پتانسیل موجود، استحصال فعلی و دورنمای آینده)"، سومین همایش ملی انرژی ایران، تهران.

[4]. Cowgill Steven, M. (2011). "Optimized Biogas Production at Malabar Sewage Treatment Plant, A dissertation in partial fulfillment of requirements for the degree of Master of Science", School of Engineering and Energy Murdoch University, Western Australia, January.

- [۵]. بخشی، م.، خانکشی‌زاده، م.، سیدزاده، ف.، قاسمی قوچقار، س. (۱۳۸۸). "اطلس پتانسیل تئوری تولید برق و انرژی از فاضلاب شهری در کشور"، سومین همایش ملی آب و فاضلاب (با رویکرد اصلاح الگوی مصرف)، تهران.
- [6]. Roati, C., Fiore S., Ruffino B., Marchese F., Novarino D., Zanetti M.C. (2012). "Preliminary Evaluation of the Potential Biogas Production of Food-Processing Industrial Wastes", American Journal of Environmental Sciences, 8 (3), 291-296.
- [7]. IPCC, (2006). "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual".
- [8]. Rittman, B. E., McCarty P.L. (2001). "Environmental Biotechnology: Principles and Applications", McGraw-Hill.
- [9]. Milbrandt A., (2005). "A Geographic Perspective on the Current Biomass Resource Availability in the United States", U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, National Renewable Energy Laboratory.
- [۱۰]. ذراتی، م. (۱۳۹۳). "نتایج اجرای مکانیسم توسعه پاک در ایران مطالعه موردی: تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران"، اولین همایش ملی توسعه پایدار منابع طبیعی تجدیدشونده، همدان.