

الحمد لله الذي جعل



دانشگاه صنعتی شاهرود

پردیس بین المللی خوارزمی
رساله دکتری مهندسی تبدیل انرژی

تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی یک تصفیه خانه فاضلاب نمونه برای تولید بیوگاز

نگارنده: سجاد ملبوسی

اساتید راهنما:

دکتر سید مجید هاشمیان

دکتر محمود مهرگان

آذر ۱۴۰۰

تقدیم بہ

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌بینم تا قدردان زحمات و محبت‌های کسانی باشم که وجودشان مایه دلگرمی من بوده و کمک‌هایشان به انجام رساندن این پژوهش را ممکن ساخته است.

نخست خانواده عزیزم که همواره همراه و پشتیبان من بوده‌اند. آنان که محبتشان مهم‌ترین انگیزه من برای کار و تلاش است.

اینان مگر ز رحمت محض آفریده‌اند

کارام جان و انس دل و نور دیده‌اند

سپس از اساتید گران‌قدر آقایان دکتر سید مجید هاشمیان و دکتر محمود مهرگان که نقاط قوت این کار حاصل راهنمایی‌های بسیار ارزشمند ایشان، و نقاط ضعف آن نتیجه اهمال اینجانب می‌باشد. خداوند بزرگ را شاکرم که توفیق به سرانجام رساندن یک تجربه ارزشمند در کنار این اساتید را نصیب من کرد و از درگاهش برای ایشان همواره آرزوی سلامتی و موفقیت دارم.

تعهد نامه

اینجانب سجاد ملبوسی دانشجوی دوره دکتری رشته مکانیک / تبدیل انرژی دانشکده پردیس بین المللی خوارزمی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی یک تصفیه خانه فاضلاب نمونه برای تولید بیو گاز تحت راهنمایی دکتر سید مجید هاشمیان و دکتر محمود مهرگان متعهد می شوم.

- ♦ تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- ♦ در استفاده از نتایج پژوهش محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- ♦ مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- ♦ حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.
- این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- ♦ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

با افزایش جمعیت کشورها و افزایش سرانه مصرف آب، میزان تولید فاضلاب در سطح دنیا افزایش پیدا کرده است. فاضلاب‌های تولید شده بخصوص برای کشورهای با آب‌وهوای خشک و بارندگی کم علاوه بر اینکه منابع آب بزرگی محسوب می‌شوند بلکه منابع آلوده کننده بزرگی نیز به حساب می‌آیند که دفع غیربهداشتی آن‌ها منجر به تخریب جدی محیط زیست می‌گردد. به منظور کاهش آلودگی زیست محیطی، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متعددی در همه کشورها ساخته شده است. با افزایش تعداد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مشخص گردید که تصفیه فاضلاب انرژی زیادی را مصرف می‌کند به همین دلیل در سال‌های اخیر سعی بر آن شده که تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از نظر مصرف انرژی بهینه شده و از انرژی موجود در فاضلاب که لجن تولید شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است استفاده گردد. با توجه به آنکه این لجن‌ها به صورت دائمی در تصفیه‌خانه تولید می‌گردند، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به یک منبع تولید انرژی تجدید پذیر تبدیل شده‌اند که با بهینه‌سازی بازیافت انرژی در آن می‌توان، همه یا بخش بزرگی از انرژی مورد نیاز تصفیه‌خانه را تأمین نمود. در این تحقیق به ارزیابی تغییرات انرژی موجود در فاضلاب خام ورودی به تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران پرداخته شده است. همچنین ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب دیگر نیز به صورت کلی از منظر انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده که انرژی فیزیکی در مقایسه با انرژی شیمیایی در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. همچنین بخش کوچکی از انرژی فاضلاب در واحدهای آشغال و دانه گیری از چرخه تصفیه‌خانه خارج شده و قابل بازیافت انرژی نیستند. از نتایج دیگر می‌توان به تخریب بخش عمده‌ای از انرژی تصفیه‌خانه فاضلاب در راکتور هوادهی نام برد که در حدود ۳۰٪ انرژی فاضلاب ورودی می‌باشد. همچنین در حدود ۳۷۰۰ kW انرژی از طریق دفع لجن آگیری شده از تصفیه‌خانه تلف می‌گردد. علاوه بر این، تخریب انرژی در راکتور هوادهی در حدود ۹۳٪ از کل تخریب انرژی در تصفیه‌خانه را شامل می‌شود. در بررسی ۶ تصفیه‌خانه دیگر مشخص شد که هرچه ظرفیت تصفیه‌خانه بزرگ‌تر باشد، انرژی کار مصرفی در مقایسه با انرژی فاضلاب ورودی سهم کمتری در انرژی‌های ورودی با تصفیه‌خانه خواهند داشت. همچنین با افزایش انرژی بیوگاز، میزان انرژی لجن آگیری شده کاهش پیدا می‌کند. با تحلیل اقتصادی انجام گرفته مشخص شد که هرچه اندازه تصفیه‌خانه‌ها بزرگ‌تر باشد شاخص سودآوری احداث سیستم‌های CHP بزرگ‌تر و در نتیجه پروژه سودآورتر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، آنالیز انرژی، لجن، تحلیل اقتصادی

- S. Malboosi, S.M. Hashemian, M. Chahartaghi, Exergy analysis in the processes of municipal wastewater treatment plants, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2021, 1-23, <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1956646> (Impact factor: 3.447)

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه.....	۱
۱-۱- تصفیه خانه های فاضلاب.....	۲
۲-۱- سیستم تصفیه فاضلاب.....	۲
۳-۱- انواع روش های بیولوژیکی در تصفیه فاضلاب.....	۴
۱-۳-۱- استخرهای تثبیت.....	۶
۱-۱-۳-۱- استخرهای اختیاری.....	۶
۲-۱-۳-۱- استخرهای بی هوازی-استخرهای اختیاری.....	۶
۳-۱-۳-۱- لاگون های هوادهی.....	۷
۴-۱-۳-۱- لاگون های هوادهی اختیاری.....	۹
۵-۱-۳-۱- لاگون هوادهی با اختلاط کامل- استخر ته نشینی.....	۱۰
۶-۱-۳-۱- استخرهای با نرخ بالا.....	۱۱
۷-۱-۳-۱- استخرهای تکمیلی.....	۱۱
۲-۳-۱- سیستم های بی هوازی.....	۱۳
UASB-۱-۲-۳-۱.....	۱۳
۲-۲-۳-۱- فیلتر بی هوازی.....	۱۴
۳-۳-۱- لجن فعال.....	۱۵
۱-۳-۳-۱- لجن فعال متعارف.....	۱۵
۲-۳-۳-۱- هوادهی گسترده.....	۱۹
۳-۳-۳-۱- راکتور ناپیوسته متوالی یا SBR.....	۲۰
۴-۳-۳-۱- لجن فعال با حذف بیولوژیکی نیتروژن.....	۲۱
۴-۱- سیستم تصفیه فاضلاب به روش بیولاک BIOLAC برای رفع نقایص لاگون هوادهی.....	۲۱
۵-۱- وضعیت مصرف انرژی در تصفیه خانه های فاضلاب.....	۲۳
۶-۱- بررسی اجمالی وضعیت تصفیه خانه های فاضلاب در ایران.....	۲۶
فصل ۲: مروری بر تحقیقات گذشته.....	۲۹
۱-۲- مروری بر کارهای پیشین.....	۳۰
۲-۲- معرفی کار حاضر.....	۳۳
فصل ۳: توصیف سیستم و معادلات حاکم.....	۳۵
۱-۳- تصفیه خانه فاضلاب تهران.....	۳۶
۱-۱-۳- شرح فرایندها در تصفیه خانه فاضلاب.....	۳۹

۴۰	۳-۱-۲- تحلیل فرایندها در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران
۴۱	۳-۱-۳- معرفی پارامترهای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب
۴۲	۳-۲- توصیف سیستم و معادلات حاکم
۴۲	۳-۲-۱- ارزیابی ترمودینامیکی
۴۴	۳-۲-۲- آنالیز اگزرژی:
۴۶	۳-۲-۳- معادلات بالانس اگزرژی:
۴۹	۳-۲-۴- پارامترهای اقتصادی
۴۹	۳-۲-۴-۱- روش ارزش حال خالص
۴۹	۳-۲-۴-۲- فاکتور تنزیل
۵۰	۳-۲-۴-۳- شاخص سودآوری
۵۰	۳-۲-۴-۴- زمان بازگشت سرمایه
۵۰	۳-۲-۴-۵- هزینه کل
۵۱	فصل ۴: نتایج و بحث
۵۲	۴-۱- مدل‌سازی
۵۴	۴-۲- نتایج و بحث
۵۵	۴-۲-۱- تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران
۶۱	۴-۲-۲- دیگر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در تهران
۶۲	۴-۲-۲-۱- اگزرژی ورودی و خروجی از تصفیه‌خانه‌ها
۶۸	۴-۲-۲-۲- ارزیابی اگزرژی در تصفیه‌خانه‌ها
۸۲	۴-۳- مطالعه اقتصادی
۸۷	فصل ۵: نتیجه‌گیری
۸۸	۵-۱- جمع‌بندی
۸۹	۵-۲- پیشنهادات
۹۰	مراجع

فهرست تصاویر

- شکل (۱-۱) نمایی از فرایند استخرهای اختیاری ۶
- شکل (۲-۱) نمایی از فرایند استخرهای بی‌هوازی-استخرهای اختیاری ۷
- شکل (۳-۱) نمایی از فرایند لاگون های هوادهی اختیاری ۱۰
- شکل (۴-۱) نمایی از فرایند لاگون هوادهی با اختلاط کامل- استخر ته‌نشینی ۱۱
- شکل (۵-۱) نمایی از فرایند UASB ۱۴
- شکل (۶-۱) نمایی از فرایند فیلتر بی‌هوازی ۱۵
- شکل (۷-۱) نمایی از فرایند سیستم لجن فعال ۱۶
- شکل (۸-۱) نمایی از فرایند هوادهی گسترده ۲۰
- شکل (۹-۱) نمایی از سیستم با راکتور ناپیوسته متوالی ۲۱
- شکل (۱۰-۱) تغییرات مصرف برق در فرایندهای مختلف تصفیه فاضلاب [۱۱] ۲۵
- شکل (۱۱-۱) میزان مصرف انرژی در روش OD و لجن فعال بدون فرایند سوزاندن در ژاپن [۱۰] ۲۵
- شکل (۱۲-۱) میزان مصرف انرژی در فرایند لجن فعال همراه با سوزاندن و تصفیه پیشرفته فاضلاب ۲۶
- شکل (۱-۳) نمای اول از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران ۳۷
- شکل (۲-۳) نمای دوم از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران ۳۸
- شکل (۳-۳) فرایند آبگیری در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران ۳۸
- شکل (۴-۳) شماتیکی از فرایندهای تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران ۳۹
- شکل (۵-۳) یک حجم کنترل برای معادله موازنه جرمی ۴۲
- شکل (۱-۴) مقایسه مقادیر انرژی فیزیکی و شیمیایی ۵۷
- شکل (۲-۴) بازده انرژی تابعی واحدهای تصفیه‌خانه فاضلاب و مبدل حرارتی ۵۸
- شکل (۳-۴) نسبت تخریب انرژی هر واحد به تخریب انرژی کل (%) ۵۹
- شکل (۴-۴) دیاگرام گراسمن جریان تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران ۶۱
- شکل (۵-۴) بیشترین انرژی موجود در فاضلاب ورودی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ۶۳
- شکل (۶-۴) کمترین انرژی موجود در فاضلاب ورودی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ۶۴
- شکل (۷-۴) میانگین انرژی موجود در فاضلاب ورودی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ۶۴
- شکل (۸-۴) انرژی موجود در پساب خروجی تصفیه‌خانه‌ها متناظر با بیشترین انرژی موجود در فاضلاب ورودی ۶۵
- شکل (۹-۴) انرژی موجود در پساب خروجی تصفیه‌خانه‌ها متناظر با کمترین انرژی موجود در فاضلاب ورودی ۶۶
- شکل (۱۰-۴) میانگین انرژی موجود در پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ۶۶

- شکل (۱۱-۴) تغییرات اگزرژی فاضلاب ورودی ۶۷
- شکل (۱۲-۴) تغییرات اگزرژی پساب متناسب با تغییرات اگزرژی فاضلاب ورودی ۶۸
- شکل (۱۳-۴) تحلیل اگزرژی برای تصفیه‌خانه شماره یک ۶۹
- شکل (۱۴-۴) تحلیل اگزرژی برای تصفیه‌خانه شماره دو ۷۰
- شکل (۱۵-۴) تحلیل اگزرژی برای تصفیه‌خانه شماره سه ۷۱
- شکل (۱۶-۴) تحلیل اگزرژی برای تصفیه‌خانه شماره چهار ۷۲
- شکل (۱۷-۴) تحلیل اگزرژی برای تصفیه‌خانه شماره پنج ۷۳
- شکل (۱۸-۴) تحلیل اگزرژی برای تصفیه‌خانه شماره شش ۷۴
- شکل (۱۹-۴) اگزرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب شماره یک (a)نسبت اگزرژی های ورودی (b) نسبت اگزرژی در فرایندهای مختلف نسبت به اگزرژی فاضلاب ۷۶
- شکل (۲۰-۴) اگزرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب شماره دو (a)نسبت اگزرژی های ورودی (b) نسبت اگزرژی در فرایندهای مختلف نسبت به اگزرژی فاضلاب ۷۷
- شکل (۲۱-۴) اگزرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب شماره سه (a)نسبت اگزرژی های ورودی (b) نسبت اگزرژی در فرایندهای مختلف نسبت به اگزرژی فاضلاب ۷۸
- شکل (۲۲-۴) اگزرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب شماره چهار (a)نسبت اگزرژی های ورودی (b) نسبت اگزرژی در فرایندهای مختلف نسبت به اگزرژی فاضلاب ۷۹
- شکل (۲۳-۴) اگزرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب شماره پنج (a)نسبت اگزرژی های ورودی (b) نسبت اگزرژی در فرایندهای مختلف نسبت به اگزرژی فاضلاب ۸۰
- شکل (۲۴-۴) اگزرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب شماره شش (a)نسبت اگزرژی های ورودی (b) نسبت اگزرژی در فرایندهای مختلف نسبت به اگزرژی فاضلاب ۸۱

فهرست جداول

جدول (۱-۱) سیستم‌های تصفیه فاضلاب	۳
جدول (۲-۱) انواع روش‌های موجود در تصفیه فاضلاب	۵
جدول (۳-۱) تعداد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و جمعیت تحت پوشش [۱۲]	۲۷
جدول (۴-۱) وضعیت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در ایران [۱۲]	۲۷
جدول (۱-۳) معادلات موازنه انرژی واحدهای تصفیه‌خانه فاضلاب تهران	۴۷
جدول (۲-۳) معادلات بازده انرژی تابعی واحدهای تصفیه‌خانه فاضلاب تهران	۴۸
جدول (۱-۴) دبی فاضلاب در قسمت‌های مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب تهران	۵۲
جدول (۲-۴) COD فاضلاب در قسمت‌های مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب تهران	۵۳
جدول (۳-۴) پارامترهای ورودی در شبیه‌سازی	۵۳
جدول (۴-۴) ضرایب کلی انتقال حرارت برای هاضم بی‌هوازی [۳۳]	۵۳
جدول (۵-۴) انرژی شیمیایی عناصر	۵۴
جدول (۶-۴) نوع جریان، دبی جرمی و مشخصات ترمودینامیکی در تصفیه‌خانه فاضلاب تهران	۵۶
جدول (۷-۴) مشخصات ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب شهری در شهر تهران [۳۴]	۶۲
جدول (۸-۴) انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مورد مطالعه	۷۵

علائم لاتین	
نرخ اکسیژن خواهی بیولوژیکی	BOD
نرخ اکسیژن خواهی شیمیایی	COD
ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت [kJ/kg K]	C_p
فاکتور تنزیل	DF
اگرژی [kW]	ex
دبی حجمی [m ³ /d]	flow
آنتالپی مخصوص [kJ/kg]	h
ارزش حرارتی پایین [kJ/kg]	LHV
دبی جرمی [kg/s]	$\dot{m}$
سودآوری پروژه در زمان حال	NPV
فشار [kPa]	P
ارزش حال خالص	PV
نرخ انتقال حرارت [kW]	$\dot{Q}$
دما [K]	T
مواد معلق جامد	TSS
ضریب کلی انتقال حرارت [kW/m ² K]	U
حجم [m ³]	V
قدرت [kW]	$\dot{W}$
هزینه سرمایه گذاری	Z
دبی حجمی لجن [m ³ /d]	G
اگرژی [kW]	$\dot{E}_x$
زمان ماند [d]	SRT
توان مصرفی مخصوص [kWh/ m ³]	SPC

علائم یونانی	
γ	نسبت گرماهای ویژه
η	بازده
ψ	راندمان انرژی
ξ	نسبت انرژی به ارزش حرارتی سوخت

زیرنویس‌ها	
e	outlet condition
i	inlet condition
cv	Control volume
d	destruction
ph	physical
ch	chemical
f	fuel
0	Environment condition

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- تصفیه خانه‌های فاضلاب^۱

تصفیه خانه‌های فاضلاب به منظور کاهش آلودگی آب‌های سطحی و غیر سطحی از طریق دفع فاضلاب تصفیه نشده به آن‌ها به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. رشد جمعیت، صنعتی شدن، افزایش کشاورزی و توسعه شهرنشینی منجر به افزایش تقاضا برای آب شده و به طبع آن مقدار فاضلاب تولید شده نیز افزایش پیدا کرده است. به‌طور متداول، تصفیه فاضلاب با هدف کاهش آلودگی‌ها، حفاظت از سلامت عمومی و محیط‌زیست از طریق حذف مواد تجزیه‌پذیر^۲، مغذی^۳ و پاتوژن‌ها^۴ انجام می‌شد درحالی‌که امروزه استفاده مجدد از فاضلاب یکی از روش‌های موجود به‌منظور مدیریت بهتر منابع آبی معرفی شده است. اگرچه امروزه استفاده مجدد از فاضلاب یکی از راه‌های اصلی غلبه بر کم آبی می‌باشد اما تنها تعداد اندکی از کشورها این‌گونه طرح‌ها را به مرحله اجرا درآورده‌اند. دائمی بودن تولید فاضلاب، منجر به ارتقای کارکرد تصفیه خانه‌های فاضلاب در سطح جهانی شده است به‌گونه‌ای که از طریق آن می‌توان به سه منبع آب، انرژی (متان از طریق هاضم‌های بی‌هوازی^۵) و مواد آلی به‌صورت پایدار دسترسی پیدا کرد. استفاده از پساب‌های تولید شده در تصفیه خانه‌های فاضلاب نیاز به امکان‌سنجی مهندسی، حفظ سلامت و همراهی و درک اجتماعی جامعه از این منبع ارزشمند دارد [۱].

۱-۲- سیستم تصفیه فاضلاب

سیستم تصفیه فاضلاب^۶ شامل ترکیبی از واحدهای اجرایی و واحدهای فرآیندی طراحی شده به‌منظور کاهش آلاینده‌های مشخص فاضلاب تا یک سطح قابل قبول می‌باشد. سیستم‌های تصفیه فاضلاب معمولاً به سطح‌های، مقدماتی^۷، اولیه^۸، ثانویه^۱ و پیشرفته^۲ تقسیم‌بندی می‌شود که در جدول (۱-۱) آورده شده است.

^۱ Wastewater treatment plants

^۲ Biodegradable

^۳ Nutrient

^۴ Pathogen

^۵ Anaerobic digester

^۶ Wastewater treatment system

^۷ Preliminary

^۸ Primary

جدول (۱-۱) سیستم‌های تصفیه فاضلاب [۲]

سطح	حذف
مقدماتی	مواد جامد معلق^۳ بزرگ
اولیه	- مواد جامد قابل ته‌نشینی - بخشی از BOD^۴
ثانویه	- بخشی از BOD - BOD محلول
پیشرفته	- مواد مغذی^۵ - پاتوژن‌ها^۶ - ترکیبات تجزیه‌ناپذیر - فلزات - مواد محلول غیر ارگانیک - باقی‌مانده مواد معلق

هدف از تصفیه مقدماتی تنها حذف مواد جامد بزرگ است درحالی‌که در تصفیه اولیه هدف حذف مواد جامد قابل ته‌نشینی و قسمتی از مواد آلی^۷ می‌باشد. در هر دو سطح از تصفیه ذکر شده استفاده مکانیزم‌های فیزیکی برای حذف آلودگی، مکانیزم غالب می‌باشد. در تصفیه ثانویه هدف حذف مواد آلی و نیتروژن و فسفر موجود از طریق مکانیزم‌های بیولوژیکی می‌باشد. هدف از تصفیه پیشرفته حذف آلودگی‌های مشخصی (به‌طورمعمول سمی و غیرقابل تجزیه) و یا تکمیل حذف آلودگی‌هایی است که به‌خوبی در تصفیه ثانویه حذف نشده‌اند. استفاده از تصفیه پیشرفته در کشورهای درحال توسعه به‌ندرت اتفاق می‌افتد [۲].

¹ Aecondary

² Tertiary

³ Suspended solids

⁴ Biological oxygen demand

⁵ nutrients

⁶ pathogenic

⁷ organic

روش‌های تصفیه فاضلاب از ترکیب واحدهای اجرایی^۱ و فرایندی^۲ شکل می‌گیرد و منجر به ایجاد یک سیستم تصفیه می‌گردد. با توجه به اینکه بسیاری از فرایندها در یک واحد به وقوع می‌پیوندد مفهوم واحد اجرایی و واحد فرایندی بجای یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در یک بیان کلی عبارات فوق به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

- واحد اجرایی فیزیکی^۳: روش‌های تصفیه‌ای هستند که اغلب از نیروهای فیزیکی در آن‌ها استفاده می‌شود (مانند آشغال‌گیری، اختلاط، ته‌نشینی و غیره).
- واحد فرایندی شیمیایی: روش‌های تصفیه‌ای هستند که در آن‌ها حذف یا تبدیل آلودگی‌ها از طریق افزودن محصولات شیمیایی و یا به علت واکنش‌های شیمیایی به وقوع می‌پیوندند (مانند گندزدایی^۴، جذب^۵).
- واحد فرایندی بیولوژیکی: روش‌های تصفیه‌ای هستند که حذف آلودگی در آن‌ها از طریق فعالیت بیولوژیکی انجام می‌شود (مانند نیترات‌زدایی^۶) [۳].

۱-۳- انواع روش‌های بیولوژیکی در تصفیه فاضلاب

روش‌های بیولوژیکی متنوعی برای تصفیه فاضلاب وجود که در ۵ دسته استخرهای تثبیت سازی، دفع در زمین، سیستم‌های بی‌هوازی، لجن فعال و راکتورهای هوازی دسته‌بندی می‌شوند. جدول (۱-۲) انواع روش‌های موجود در هر دسته را نشان می‌دهد [۴].

¹ operation

² process

³ Physical unit operation

⁴ disinfection

⁵ adsorption

⁶ denitrification

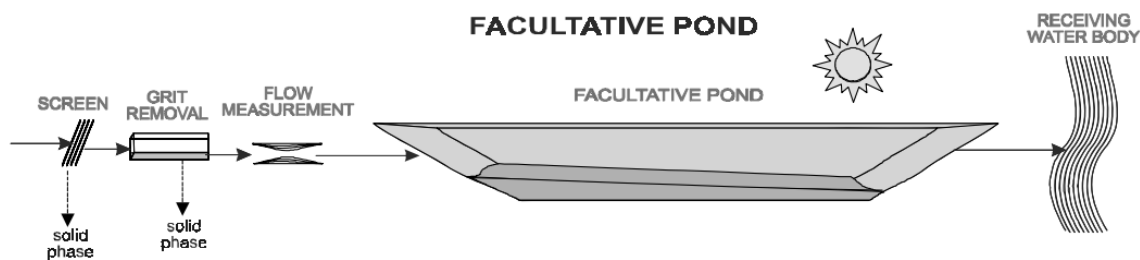
جدول (۲-۱) انواع روش‌های موجود در تصفیه فاضلاب [۴]

STABILISATION PONDS	• Facultative pond
	• Anaerobic pond –facultative pond
	• Facultative aerated lagoon
	• Completely mixed aerated lagoon – sedimentation pond
	• High rate ponds
	• Maturation ponds
LAND DISPOSAL	• Slow rate system
	• Rapid infiltration
	• Subsurface infiltration
	• Overland flow
	• Constructed wetlands
ANAEROBIC SYSTEMS	• Upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB)
	• Anaerobic filter
	• Anaerobic reactor – post-treatment
ACTIVATED SLUDGE	• Conventional activated sludge
	• Activated sludge (extended aeration)
	• Intermittently operated activated sludge (sequencing batch reactors)
	• Activated sludge with biological nitrogen removal
	• Activated sludge with biological nitrogen and phosphorus removal
AEROBIC BIOFILM REACTORS	• Low rate trickling filter
	• High rate trickling filter
	• Submerged aerated biofilter
	• Rotating biological contactor (biodisc)

۱-۳-۱- استخرهای تثبیت^۱

۱-۱-۳-۱- استخرهای اختیاری^۲

در این روش جریان‌های فاضلاب به‌طور ممتد از استخر مخصوصی که برای تصفیه فاضلاب ساخته شده است عبور می‌کند. فاضلاب برای روزهای بسیار زیادی در استخر باقی می‌ماند. ذرات محلول و نرم تشکیل‌دهنده BOD به‌صورت هوازی توسط باکتری‌هایی که در میان فاز مایع فاضلاب رشد می‌کنند تثبیت می‌شود و مواد معلق سنگین‌تر به‌صورت تدریجی ته‌نشین شده و به‌صورت بی‌هوازی توسط باکتری‌ها در کف استخر تثبیت می‌شود. در این روش اکسیژن موردنیاز برای باکتری‌های هوازی توسط فتوسنتز جلبک‌ها تأمین می‌گردد. عیب بزرگ این روش نیاز به زمین وسیع برای ایجاد استخرهای مورد نظر است. این فرایند در شکل (۱-۱) نشان داده شده است [۴].



شکل (۱-۱) نمایی از فرایند استخرهای اختیاری [۵]

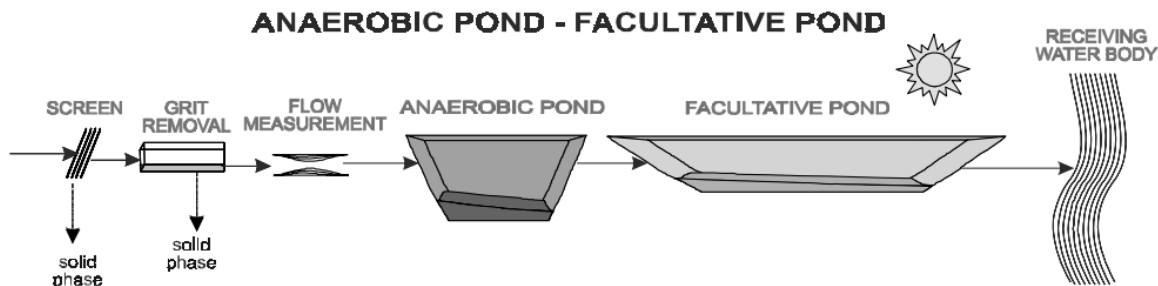
۱-۳-۱-۲- استخرهای بی‌هوازی^۳ - استخرهای اختیاری

در این روش در حدود ۵۰ تا ۶۵٪ BOD فاضلاب در استخرهای بی‌هوازی که به نسبت استخرهای اختیاری عمیق‌تر و با حجم کوچک‌تر است تثبیت می‌گردد درحالی‌که مابقی BOD در استخرهای اختیاری حذف می‌گردد. این سیستم فضای کمتری نسبت به یک استخر اختیاری منفرد می‌گیرد. این فرایند در شکل (۲-۱) نشان داده شده است [۵].

¹ Stabilisation ponds

² Facultative ponds

³ Anaerobic ponds



شکل (۲-۱) نمایی از فرایند استخرهای بی‌هوازی-استخرهای اختیاری [۵]

۳-۱-۳-۱- لاگون های هوادهی

لاگون هوادهی متشکل از یک برکه با دیواره خاکی و هوادهی مصنوعی، مجهز به هوادهای شناور است. بعد از این لاگون یک استخر ته‌نشینی یا برکه تثبیت اختیاری قرار دارد که به‌عنوان زلال‌ساز نهایی عمل می‌کند. جامدات بیولوژیکی تولید شده در لاگون هوادهی به‌وسیله استخر ته‌نشینی یا برکه تثبیت جداسازی می‌شوند. استخر ته‌نشینی معمولاً بتنی و مجهز به چنگک‌های مکانیکی لجن است تا برداشت لجن به‌صورت مداوم باشد. اگر برکه تثبیت بکار برده شود، جامدات بیولوژیکی در کف ته‌نشین شده و تجزیه بی‌هوازی روی می‌دهد. برکه به‌طور متناوب، معمولاً هر دو یا سه سال یک‌بار تخلیه و مواد جامد هضم شده دفن بهداشتی می‌شود. فرآیند لاگون هوادهی ذاتاً یک فرآیند لجن فعال بدون برگشت است که معمولاً غلظت مواد جامد بیولوژیکی آن در حدود ۲۰۰ تا ۵۰۰ mg/l می‌باشد. لاگون های هوادهی به‌طور وسیعی در تصفیه فاضلاب صنعتی بکار برده می‌شوند زیرا بسیار کم‌هزینه‌تر از لجن فعال می‌باشد. در عین حال به زمین بیشتری نیاز دارند که باید مورد توجه قرار گیرد. غالباً، فرآیند تصفیه فاضلاب صنعتی در ابتدا سیستم برکه تثبیت است و با افزایش بارگذاری، هوادهی مصنوعی به آن اضافه می‌شود تا برکه به لاگون های هوادهی تبدیل شوند [۴].



شکل (۱-۳) فرآیند لاگون هوادهی

لاگون های هوادهی را می توان بسته به پروفیل اکسیژن محلول به لاگون های هوازی یا اختیاری دسته بندی کرد. در لاگون های هوازی، در کل عمق برکه اکسیژن محلول وجود دارد و اختلاط نیز به منظور معلق نگه داشتن مواد جامد بیولوژیکی کافی است. در لاگون هوادهی، زلال سازی نهایی توسط یک حوض ته نشینی یا برکه تثبیت اختیاری تأمین می شود. لاگون اختیاری در اعماق فوقانی خود دارای اکسیژن محلول است و در اعماق پایین هیچ اکسیژن محلولی ندارد. در لاگون اختیاری میزان اختلاط برای معلق نگه داشتن تمامی مواد جامد بیولوژیکی کافی نبوده و تجزیه و تلاشی مواد جامد در کف لاگون به وقوع می پیوندد. این مواد جامد تحت تجزیه بی هوازی قرار گرفته و در فواصل زمانی چندین سال تخلیه می شوند. لاگون اختیاری معمولاً دارای زلال ساز نهایی نمی باشد به جز آنچه که در خود لاگون هوادهی روی می دهد. در نتیجه، میزان مواد جامد موجود در خروجی اغلب تعیین کننده نوع استفاده از آن هاست [۴].

لاگون های هوادهی معمولاً دارای شکل مستطیلی هستند مگر اینکه فضای موجود این امکان را فراهم نسازد. وقتی که این لاگون ها مستطیلی هستند، نسبت طول به عرض معمولاً برابر ۲ به ۱ می باشد. باید حداقل دو لاگون برای انعطاف بخشیدن به آن منظور شده و لوله کشی باید به نحوی باشد که راهبری ها به صورت سری

و موازی امکان‌پذیر باشد. زهکش‌های سطحی را توسط دیواره‌های خاکی یا نهرهای کناری باید مهار نمود. خاک‌ریزهایی که به لاگون شکل می‌دهند باید دارای شیب کناری ۱ به ۳ یا کمتر باشند و باید سنگریزه یا حفاظ‌های مناسب دیگری بکار برده شوند تا از فرسایش ناشی از امواج جلوگیری شود. شیب‌های خارجی باید پوشش گیاهی داشته باشد تا از فرسایش ناشی از رواناب باران اجتناب گردد. در صورتی که خاک متخلخل باشد، باید کف و دیواره‌های لاگون با یک‌لایه خاک به‌صورت یک مانع نفوذناپذیر درست شود. ورودی‌ها باید فاضلاب ورودی را در لاگون توزیع نمایند و خروجی‌ها باید بافل گذاری شوند تا از خارج شدن مواد شناور جلوگیری شود. باید عمق آزاد حداقلی برابر 0.9 m منظور شود. فونداسیون بتنی باید در زیر هر یک از هواده‌ها درست شود تا کف آن را در برابر فرسایش محافظت کند. باید زلال‌ساز نهایی یا برکه‌های تثبیت منظور شوند تا جامدات بیولوژیکی را از خروجی نهایی جدا نمایند. عمق لاگون برابر $4.88 \text{ m} - 2.43 \text{ m}$ می‌باشد.

نیاز اکسیژنی حداقلی برابر $1/6$ کیلوگرم اکسیژن به ازای کیلوگرم BOD_5 باید در لاگون تأمین شود. میزان قدرت تولید شده توسط هواده‌ی مصنوعی باید حداقل برابر $1000 \text{ m}^3 / 3.95 \text{ KW}$ باشد تا از معلق نگه‌داشتن مواد جامد بیولوژیکی در داخل سوسپانسیون اطمینان حاصل شود.

امتیازات این روش در مقایسه با برکه‌های طبیعی چنین است:

۱- تخلیه بیشتر فاضلاب و توزیع بهتر اکسیژن در محیط

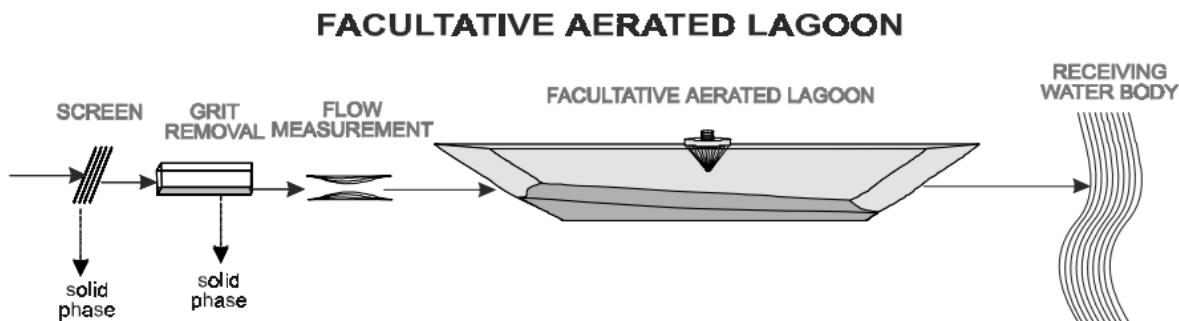
۲- مخلوط شدن یکنواخت‌تر مواد آلاینده و میکروارگانیسم‌ها

۳- امکان هدایت اکسیژن ورودی و بدین ترتیب هدایت فرآیند تصفیه

تجزیه بار آلودگی آلی فاضلاب هم‌زمان با تثبیت هوازی لجن ته‌نشین شده در بستر انجام می‌شود نظر به این‌که باکتری‌های نیتریفیکاسیون به‌طور دائم از برکه هواده‌ی شسته می‌شوند معمولاً به‌ندرت می‌توان در این برکه‌ها شاهد فرآیند نیتریفیکاسیون / دنیتریفیکاسیون بود [۶].

۱-۳-۴- لاگون‌های هواده‌ی اختیاری

مکانیزم این روش برای حذف BOD مشابه استخرهای اختیاری می‌باشد. البته اکسیژن موردنیاز در این روش بجای تأمین از روش فتوسنتز از طریق هواده‌های مکانیکی تأمین می‌گردد. با توجه به اینکه هواده‌ی در این روش منجر به معلق ماندن مواد جامد در فاضلاب نمی‌شود و بیشتر مواد جامد در نهایت ته‌نشین می‌شوند، بیشتر این مواد از طریق بی‌هوازی تثبیت می‌گردند. این فرایند در شکل (۱-۳) نشان داده شده است.



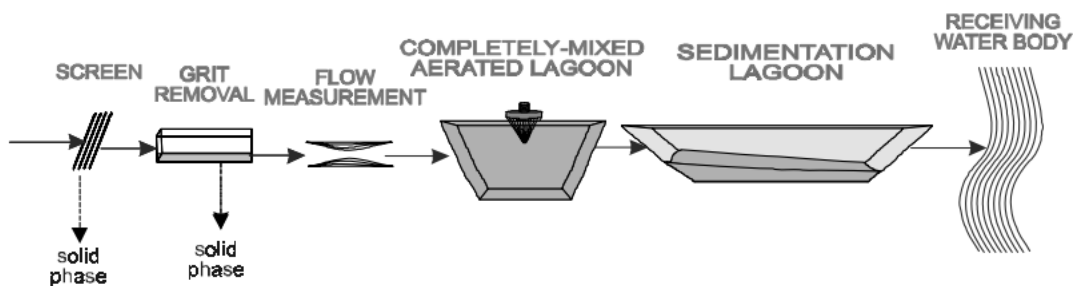
شکل (۴-۱) نمایی از فرایند لاگون های هوادهی اختیاری [۲]

۱-۳-۵- لاگون هوادهی با اختلاط کامل^۱ - استخر ته‌نشینی

در این روش مقدار انرژی موردنیاز برای هر واحد حجم استخر زیاد می‌باشد اما به علت استفاده از اختلاط کامل منجر می‌شود که مواد جامد ته‌نشین نگردد. این امر منجر به افزایش غلظت مواد زیست‌توده در قسمت مایع فاضلاب می‌شود که نتیجه آن حذف بیشتر BOD و افزایش راندمان استخر است. در مقابل، به علت افزایش راندمان حذف BOD استخر موردنیاز در این روش در مقایسه با لاگون هوادهی اختیاری کوچک‌تر است. اگرچه که در این روش، پساب خروجی از این استخرها به علت وجود باکتری‌های بسیار زیاد موجود در آن‌ها دارای بار آلودگی زیادی می‌باشند و نیاز است که قبل از تخلیه به آب‌های سطحی، سطح آلودگی پساب کاهش پیدا کند. استخر ته‌نشینی در نظر گرفته شده در این روش شرایط را برای حذف این آلودگی فراهم می‌کند. لازم به ذکر است لجنی که در استخرهای ته‌نشینی تولید می‌گردد لازم که به‌صورت روزانه از استخر تخلیه شود. این فرایند در شکل (۴-۱) نشان داده شده است [۶].

¹ Completely mixed aerated lagoon-sedimentation pond

COMPLETE-MIX AERATED LAGOON - SEDIMENTATION POND



شکل (۵-۱) نمایی از فرایند لاگون هوادهی با اختلاط کامل - استخر ته‌نشینی [۲]

۱-۳-۶- استخرهای با نرخ بالا^۱

استخرهای با نرخ بالا بر مفهوم تولید حداکثری جلبک استوار است تا شرایط محیطی کاملاً هوازی را به وجود آورد. برای دستیابی به این هدف، از استخرهای کم‌عمق‌تری استفاده می‌شود تا نور از میان مواد مایع عبور کند. در نتیجه آن، میزان فعالیت فتوسنتز افزایش پیدا می‌کند که منجر به افزایش غلظت اکسیژن حل شده و PH می‌گردد. این پارامترها منجر به مرگ پاتوژن‌ها و حذف مواد مغذی می‌گردد. استخرهای با نرخ بالا معمولاً بار آلی زیادی را پذیرا می‌باشند. به‌طور معمول در فاز مایع استخر از یک همزن مکانیکی با مصرف انرژی پایین استفاده می‌شود [۶].

۱-۳-۷- استخرهای تکمیلی^۲

هدف اصلی در استخرهای تکمیلی حذف پاتوژن‌ها می‌باشد. در استخرهای تکمیلی شرایط محیطی به‌گونه‌ای تنظیم می‌گردد که مخالف با شرایط زیستی پاتوژن‌ها باشد مانند PH بالا، دمای پایین، کمبود مواد مغذی و طعمه شدن برای موجودات دیگر.

در بین انواع روش‌های مورد استفاده برای تصفیه انواع فاضلاب‌ها و پساب‌ها دو روش استفاده از لاگون‌های هوادهی و استفاده از برکه‌های تثبیت از برخی جهات به یکدیگر شباهت‌هایی دارند. باین حال لازم است

¹ High rate pond

² Maturation pond

تفاوت‌های این دو سیستم مشخص شود.

- لاگون‌های هوادهی (aerated lagoons)

عبارت‌اند از لاگون‌هایی نسبتاً کم‌عمق که در هر یک از آن‌ها پساب از یک نقطه در کناره لاگون و یا در وسط آن وارد شده و خروجی (effluent) در نقطه‌ای دیگر قرار دارد. زمان‌ماند (retention time) در این لاگون‌ها تابعی است از درصد حذف BOD و ممکن است از ۶ تا ۱۸ روز باشد. در این لاگون‌ها درصد حذف BOD می‌تواند از ۷۵ تا ۹۰ درصد باشد. اکسیژن موردنیاز برای تصفیه در چنین سیستمی با استفاده از هواده‌ها (aerators) یا با استفاده از واحدهای هوادهی منتشر (diffused aeration units) تأمین می‌شود. عملکرد هواده‌ها بر معلق ماندن جامدات موجود در لاگون در حالت سوسپانسیون تأثیر دارد. برحسب میزان تلاطم ممکن است که لاگون‌های هوادهی به‌صورت سیستم هوازی (aerobic) و یا به‌صورت سیستم هوازی-بی‌هوازی (aerobic-anaerobic) عمل کنند. در لاگون‌های هوازی همه جامدات بیولوژیک در سوسپانسیون و در جریان می‌باشند و تثبیت (stabilization) مواد آلی در شرایط هوازی انجام می‌شود. در مورد لاگون‌های هوازی-بی‌هوازی بخش عمده‌ای از جامدات در کف لاگون‌ها رسوب می‌کند. در نتیجه با تشکیل جامدات در چنین لاگونی بخشی از آن تحت تجزیه بی‌هوازی قرار می‌گیرد. بنابراین در مورد چنین لاگون‌هایی بخشی از فرآیند تثبیت جامدات تحت شرایط هوازی و بخشی تحت شرایط بی‌هوازی انجام می‌گیرد.

- برکه‌های تثبیت (stabilization ponds)

در زبان انگلیسی کلمه Pond بیشتر به مفهوم برکه یا استخری است که به‌صورت مصنوعی ایجاد شده است. یک برکه تثبیت (استخر تثبیت) یا «oxidation pond» معمولاً یک آبگیر خاکی کم‌عمق و با شکلی مشخص و طراحی شده است که برای تصفیه پساب‌های جوامع کوچک و یا تأسیسات صنعتی ساخته می‌شود. این استخرها معمولاً ۶۰ تا ۱۲۰ سانتیمتر (۲ تا ۴ فوت) عمق دارند. باین‌حال انواعی از استخرهای تثبیت با عمق بسیار بیشتر نیز به‌صورت موفقیت‌آمیزی استفاده شده‌اند. استخرهای تثبیت یا به‌صورت منفرد به‌عنوان بخشی از یک سیستم کلی تصفیه استفاده می‌شوند و یا به‌تنهایی به کار گرفته می‌شوند تا تصفیه کامل انجام شود.

فرآیند تصفیه در یک برکه تثبیت شامل دو مرحله اصلی برای تجزیه مواد آلی موجود در پساب است. در ابتدا مواد آلی کربنی توسط میکروارگانیسم‌های هوازی اکسید می‌شوند و دی‌اکسید کربن و اشکال غیرآلی نیتروژن و فسفر تولید می‌شوند. سپس این اشکال غیرآلی توسط جلبک‌ها و در فرآیند فتوسنتز استفاده می‌شوند. فتوسنتز فرآیندی است طبیعی که توسط گیاهان سبز و برخی دیگر از گروه‌های موجودات زنده (شامل

جلبک‌ها، سیانوباکتری‌ها و برخی از دیگر باکتری‌ها) در حضور نور انجام می‌شود. اکسیژن یکی از فرآورده‌های نهایی فتوسنتز است که در دسترس میکروارگانیسم‌های هوازی قرار می‌گیرد. در نتیجه انجام این واکنش‌ها در برکه‌های تثبیت بخشی از مواد آلی موجود در پساب اکسید شده و بخشی نیز در قالب سلول‌های جلبکی (algae cells) درمی‌آیند. این جلبک‌ها در برخی برکه‌های تثبیت جمع‌آوری کرده و برای خوراک دام به‌عنوان یک منبع پروتئینی استفاده می‌کنند. بنابراین در برکه‌های تثبیت تصفیه پساب با تولید یک فرآورده جانبی مفید امکان‌پذیر است.

اغلب برکه‌های تثبیت برای بارهای یک acre (معادل ۴۰۴۷ مترمربع) به ازای هر ۴۰۰ نفر و یا ۵۰ پوند (هر پوند معادل ۴۵۳ گرم) BOD به ازای هر acre در هر روز و با دوره‌های ماند (detention periods) معمولاً بیش از ۳۰ روز طراحی می‌شوند. خاک طبیعی که چنین برکه‌های تثبیتی در آن‌ها ساخته می‌شوند باید تا حد زیادی نفوذناپذیر باشند به‌طوری‌که نش پساب در خاک تأثیری بر سطح پساب در برکه تثبیت نداشته باشد [۶].

۱-۳-۲- سیستم‌های بی‌هوازی^۱

۱-۳-۲-۱- UASB^۲

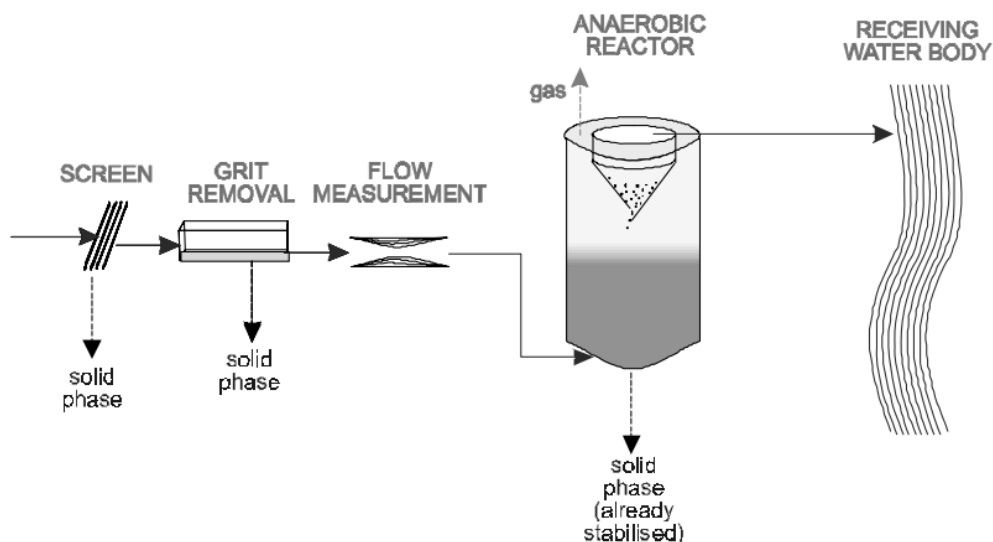
در این روش BOD به‌صورت بی‌هوازی توسط باکتری‌ها در راکتور تثبیت می‌شود. جریان مایع به سمت بالا می‌باشد. قسمت بالایی راکتور به دو قسمت ته‌نشینی و جمع‌آوری گاز تقسیم می‌گردد. در قسمت ته‌نشینی اجازه داده می‌شود تا پساب تمییز از قسمت بالایی خارج شده و به قسمت جامد توسط جاذبه به سیستم برگردد که این امر منجر به افزایش غلظت در راکتور می‌شود. بیشترین گازی که در این روش تولید می‌شود متان است. در این روش هیچ تانک ته‌نشینی اولیه وجود ندارد، میزان تولید لجن کم بوده و لجن مازاد^۳ تولید شده به‌صورت خودکار تغلیظ و تثبیت شده است. این فرایند در شکل (۱-۵) نشان داده شده است [۲].

^۱ Anaerobic system

^۲ Upflow anaerobic sludge blanket reactor

^۳ Excess sludge

UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET REACTOR

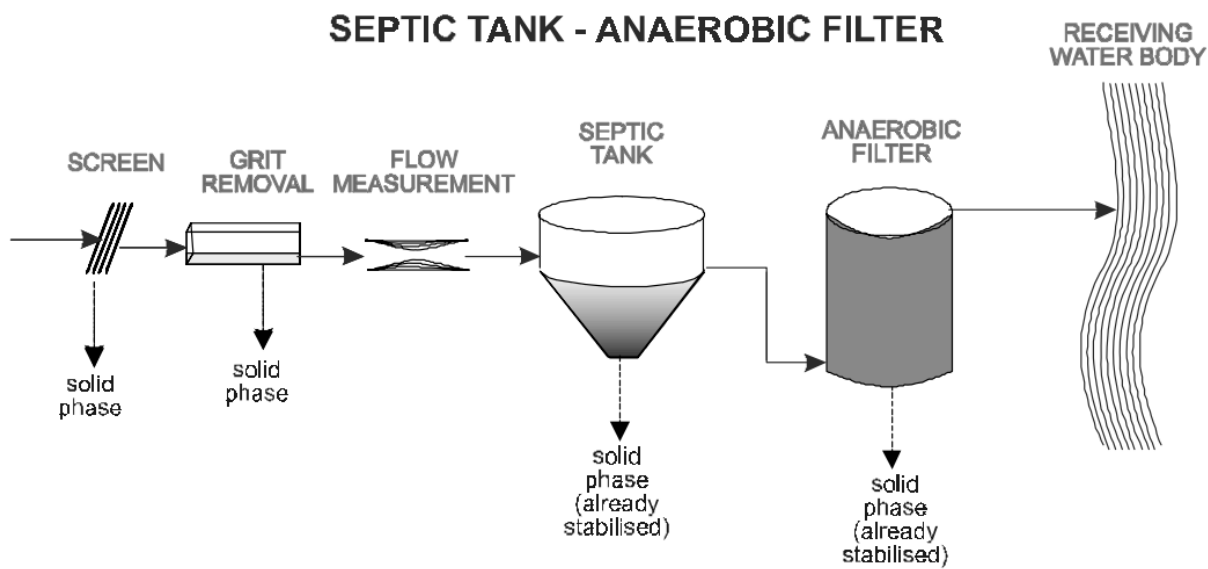


شکل (۶-۱) نمایی از فرایند UASB [۲]

۱-۲-۳-۲- فیلتر بی‌هوازی^۱

BOD به صورت بی‌هوازی در داخل راکتور توسط باکتری‌هایی که معمولاً به سنگ‌ها چسبیده شده است تثبیت می‌گردد. تانک به صورت مستغرق قرار می‌گیرد، جریان آن رو به بالا است و نیاز به یک تانک ته‌نشینی اولیه دارد. همچنین میزان تولید لجن در این روش کم بوده و لجن مازاد تولید به صورت تثبیت شده است. این فرایند در شکل (۶-۱) نشان داده شده است.

¹ Anaerobic filter



شکل (۷-۱) نمایی از فرایند فیلتر بی‌هوازی [۱]

۱-۳-۳-۱- لجن فعال

۱-۳-۳-۱- لجن فعال متعارف^۱

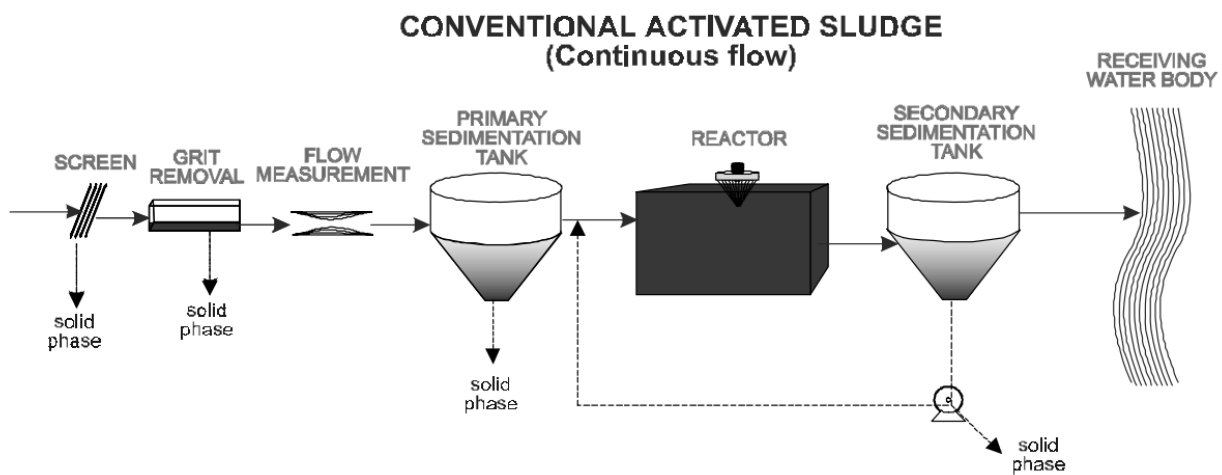
در این روش مرحله بیولوژیکی در دو واحد انجام می‌گیرد که عبارت‌اند از راکتور هوادهی و تانک ته‌نشینی ثانویه. میزان غلظت زیست‌توده در راکتور بسیار بالا بوده زیرا در این روش یک جریان برگشتی از مواد ته‌نشین شده در تانک ته‌نشینی ثانویه به راکتور هوادهی انجام می‌پذیرد. قسمت زیست‌توده فاضلاب به نسبت قسمت مایع آن، مدت زمان بیشتری در سیستم باقی می‌ماند تا از بازده بالای حذف BOD اطمینان حاصل گردد. در این روش لازم است که لجن مازاد تولید شده از سیستم خارج گردد اما این لجن تثبیت شده نیست و نیاز به یک مرحله دیگر به نام تصفیه لجن دارد تا عملیات تثبیت سازی بر روی آن انجام گیرد. در این روش میزان اکسیژن موردنیاز از طریق دمنده‌های مکانیکی یا از طریق پخش‌کننده‌های هوا تأمین می‌شود. در بالادست راکتور هوادهی تانک ته‌نشینی اولیه وجود دارد تا مواد جامد ته‌نشین شده را از فاضلاب حذف کند. این فرایند در شکل (۷-۱) نشان داده شده است. مکانیسم اصلی فرایند لجن فعال توسط واکنش بیولوژیکی زیر نشان داده شده است:

¹ Conventional activated sludge

انرژی + $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ + میکروارگانیسم $\rightarrow$ میکروارگانیسم + ماده‌ی آلی

آلاینده‌ها توسط میکروارگانیسم‌هایی حذف می‌شوند که بعداً در فاضلاب ته‌نشین و خارج می‌شوند.

ACTIVATED SLUDGE SYSTEMS



شکل (۸-۱) نمایی از فرایند سیستم لجن فعال [۱]



شکل (۹-۱) فرآیند لجن فعال با هوادهی از بالا



شکل (۱۰-۱) فرآیند لجن فعال با هوادهی از کف

• تشکیل لجن فعال

جمعیت بیولوژیکی میکروارگانیسم‌ها در فرآیند لجن فعال نقش عمده‌ای دارند. این میکروارگانیسم‌ها برای شکستن مواد آلی نیاز به آنزیم‌های ویژه‌ای دارند تا بتوانند آنها را به میکروارگانیسم‌های بیشتر، H_2O و CO_2 تبدیل نمایند به این دلیل در سیستم تصفیه‌ی فاضلاب میکروارگانیسم‌ها قبلاً باید به محیط مایع خو گیرند تا بتوانند آنزیم‌های لازم را ترشح کنند. در مرحله بعد لخته‌سازی انجام می‌شود. به این صورت که میکروارگانیسم‌ها در حوضچه‌ی هوادهی به هم برخورد می‌کنند و ذرات بزرگی بنام لخته تشکیل می‌شود. این لخته‌ها به سهولت ته نشین خواهند شد. همچنان که اختلاط این سلول‌ها در حوضچه‌ی هوادهی ادامه می‌یابد، با مواد معلق و کلوییدی نیز برخورد و اتصال پیدا می‌کنند. این اتصال سبب بزرگ شدن لخته می‌شود در نتیجه ته‌نشینی بهتر رخ می‌دهد. لجن فعال در سه مرحله‌ی مشخص تشکیل می‌گردد:

۱- مرحله‌ی انتقال

۲- مرحله‌ی تبدیل

۳- مرحله‌ی لخته‌سازی (هم آوردی)

تمام این مراحل به‌طور همزمان و مداوم در حوضچه‌ی هواده‌ی و تا حدودی در حوضچه‌ی ته‌نشینی رخ می‌دهند. ماده در ابتدا به درون سلول منتقل می‌شود.

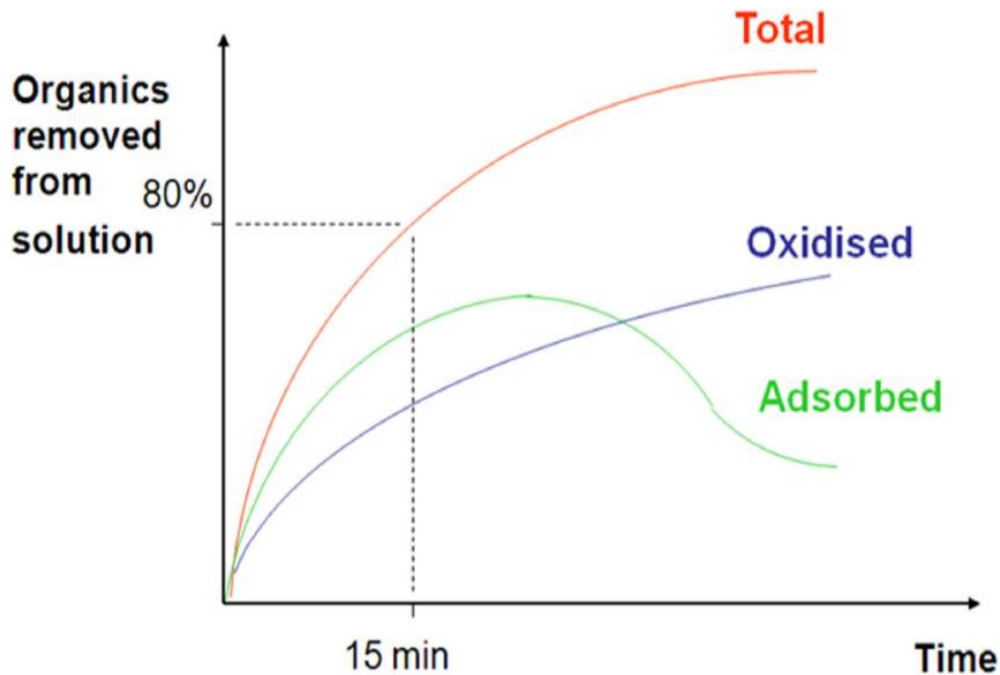
در مرحله‌ی انتقال، مواد آلی محلول از دیواره‌ی سلولی جذب میکروارگانیسم گردیده و در آنجا شکسته می‌شوند. ذرات غیر محلول در دیواره‌ی سلول جذب سطحی و نهایتاً شکسته شده و سپس از دیواره‌ی سلولی جذب می‌شوند. جذب سطحی مواد نسبتاً سریع انجام می‌گیرد و معمولاً ۱۵ تا ۳۰ دقیقه طول می‌کشد. انتقال مواد محلول از دیواره‌ی سلولی و فرآیند هضم و جذب به زمان طولانی تری نیازمند است. هنگامی که مواد جامد جذب سطحی دیواره‌ی سلولی شد، میکروارگانیسم‌ها مواد شیمیایی ترشح می‌کنند که مواد جامد غیر محلول را به شکل محلول درمی‌آورد و این مواد به همان روش آلاینده‌های محلول به درون سلول جذب می‌گردند.

پس از انتقال مواد به درون سلول، عمل هضم انجام می‌شود. مرحله‌ی تبدیل دومین گام به سوی تشکیل لجن فعال است. پس از آنکه میکروارگانیسم مواد آلی را در خود تحلیل برد، فرآیند تبدیل شروع می‌شود، فرآیند تبدیل شامل سنتز و اکسایش است. سنتز به سادگی به تکثیر سلول‌های بیشتر اشاره می‌کند و اکسایش با تشکیل گاز دی‌اکسید کربن، آب و انرژی ارتباط دارد. این دو واکنش فرآیند متابولیک میکروارگانیسم را ایجاد می‌کنند. بهتر است در سیستم تصفیه، جمعیت بیولوژیکی کثیری وجود داشته باشد، به طوریکه وقتی شماری از میکروارگانیسم‌ها آنچه را که قبلاً گرفته‌اند هضم می‌کنند، دیگران مواد آلی فاضلاب را کاهش دهند.

میکروارگانیسم‌ها برای شکستن مواد آلی ماده شیمیایی به نام آنزیم (کاتالیست‌های بیولوژیکی) تولید می‌کنند، آنزیم‌ها در درون میکروارگانیسم و در آب پیرامون آنها حضور دارند. برای شکستن مواد آلی مختلف نیاز به آنزیم‌های مخصوص هست به طوریکه جمعیت بیولوژیکی بتوانند آنها را به میکروارگانیسم‌های بیشتر، CO_2 و H_2O تبدیل نماید. به این دلیل است که در یک سیستم تصفیه‌ی فاضلاب می‌باید میکروارگانیسم‌ها قبلاً به محیط مایع خو گیرند تا بتوانند آنزیم‌های لازم را ترشح کنند. در حین راه افتادن تصفیه‌خانه میکروارگانیسم‌ها هم یاد می‌گیرند که آنزیم مورد نیاز برای شکستن ماده‌ی آلی خاص موجود در فاضلاب را به وجود آورند، میکروارگانیسم‌ها باید کاملاً به فاضلاب خو بگیرند تا بتوانند میزان آنزیم مورد نیاز را تولید کنند. نهایتاً میکروارگانیسم‌ها به همدیگر پیوسته و یک لخته را تشکیل می‌دهند.

سومین مرحله از تشکیل لجن فعال مرحله‌ی لخته‌سازی است. در حالی که میکروارگانیسم‌ها در حوضچه‌ی هواده‌ی مخلوط می‌شوند و با سایر میکروارگانیسم‌ها برخورد می‌کنند، ذرات بزرگی به نام لخته را تشکیل می‌دهند که به آسانی ته‌نشین خواهند شد، چون اختلاط این سلول‌ها در حوضچه‌ی هواده‌ی ادامه

می‌یابد، با مواد معلق و کلوییدی (آلاینده‌های غیر محلول) نیز برخورد و اتصال پیدا می‌کنند. این اتصال سبب بزرگتر شدن لخته می‌شود. سرانجام تمام جوانب سلول با این مواد پوشیده شده و دیگر ذرات بیشتری نمی‌توانند بدان بچسبند، لیکن از آنجا که میکروارگانیسم‌ها همواره سطح تازه‌ای در اختیار این مواد می‌گذارند، سلول جدید برای چسبیدن ذرات آماده می‌شود تا لخته جدیدی شکل بگیرد [۲].

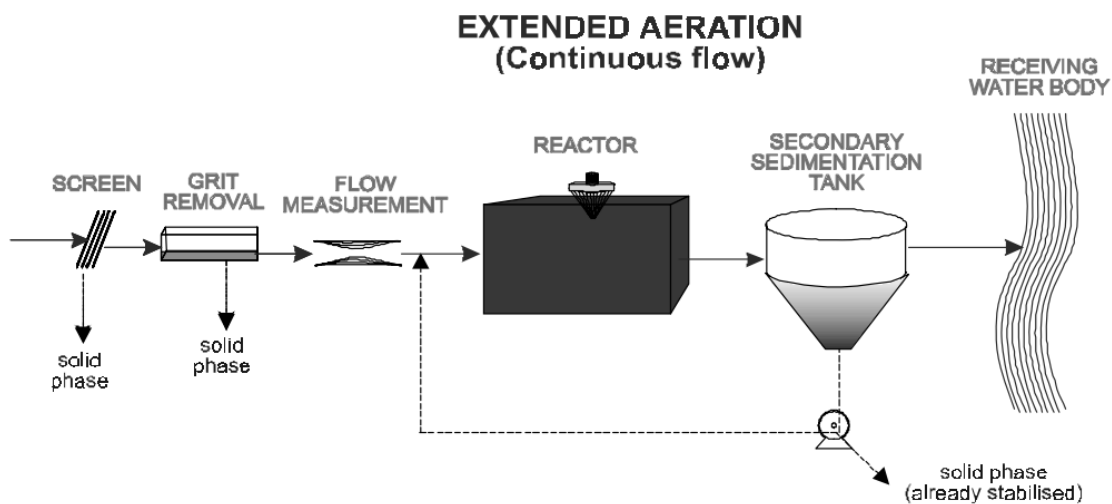


شکل (۱۱-۱) حذف مواد آلی در یک فرآیند لجن فعال [۷]

۱-۳-۲- هوادهی گسترده^۱

مشابه سیستم قبل است با این تفاوت که زیست‌توده به مدت بیشتری در سیستم می‌ماند (راکتور هوادهی بزرگ‌تر است) که این امر منجر به کاهش BOD موجود برای باکتری‌ها شده و باعث می‌شود که باکتری‌ها برای بقا و زنده ماندن وارد فاز خودخوری شوند. در نتیجه، لجن مازاد تولید شده در این روش تثبیت شده می‌باشد. این فرایند در شکل (۸-۱) نشان داده شده است.

¹ Extended aeration



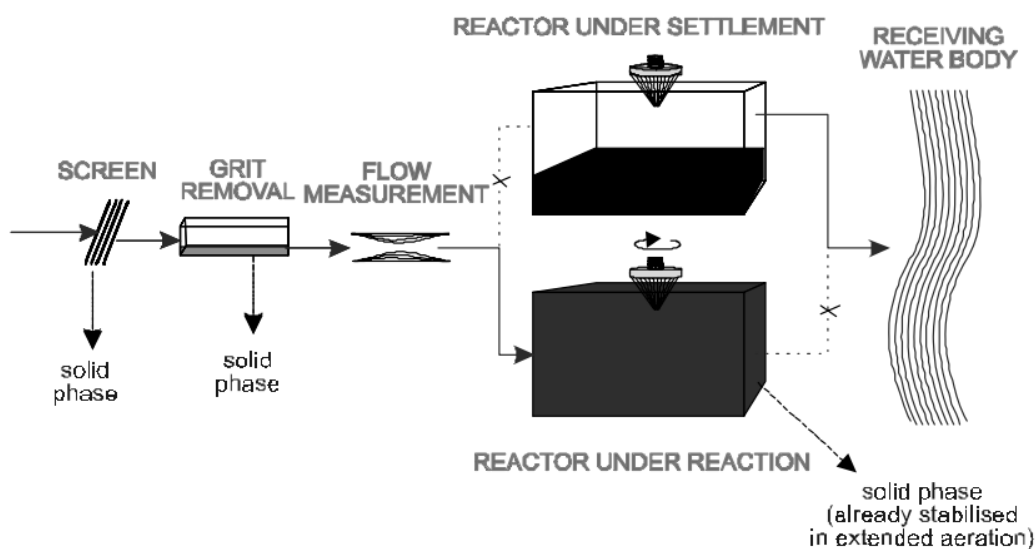
شکل (۱۲-۱) نمایی از فرایند هوادهی گسترده [۲]

۳-۳-۳-۱- راکتور ناپیوسته متوالی یا SBR^۱

عملیات سیستم در این روش به صورت متناوب است به طوری که مراحل واکنش و ته نشینی در یک تانک ولی در زمان های متفاوتی صورت می گیرد. هنگامی که راکتورها خاموش می شوند، مواد جامد ته نشین شده و پساب زلال از فاضلاب جدا می گردد. هنگامی که دمنده ها مجدداً روشن می شوند، قسمت ته نشین شده با قسمت مایع مخلوط شده بدون اینکه نیاز به استفاده از پمپ برای ایجاد جریان گردشی در تانک باشد. در این روش هیچ تانک ته نشینی ثانویه وجود ندارد. این فرایند در شکل (۹-۱) نشان داده شده است.

¹ Sequencing batch reactor

SEQUENCING BATCH REACTORS (Intermittent flow)



شکل (۱۳-۱) نمایی از سیستم با راکتور ناپیوسته متوالی [۱]

۴-۳-۳-۱- لجن فعال با حذف بیولوژیکی نیتروژن

راکتور بیولوژیکی با یک قسمت آنوکسیک (در غیاب اکسیژن اما در حضور نیترات‌ها) یکپارچه می‌شود. این قسمت آنوکسیک می‌تواند در بالادست یا پایین‌دست راکتور هوادهی قرار بگیرد. نیترات در فرایند نیتروفیکاسیون و در راکتور هوادهی تولید می‌شود و در قسمت آنوکسیک توسط میکروارگانیسم مصرف می‌شود.

۴-۱- سیستم تصفیه فاضلاب به روش بیولاک BIOLAC برای رفع نقایص

لاگون هوادهی

سیستم تصفیه فاضلاب به روش بیولاک یک سیستم تصفیه فاضلاب به روش بیولوژیکی با هوادهی گسترده جدید و اقتصادی است که از فن آوری لجن فعال با بار کم بهره می‌گیرد. این سیستم ترکیبی از زنجیره‌های هوادهی متحرک و کارا و نیز حباب ساز مستغرق و ساختار لاگون ساده جهت تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی است.

در مقایسه با لاگوتهای بزرگ، لاگوتهای هوادهی کوچک اقتصادی ترند ولی زمان ماند کوتاه اغلب منجر به مشکلات عملیاتی شده و نیاز به اتوماسیون و نظارت مداوم توسط اپراتور متخصص دارند. به علاوه به دلیل نیاز به تصفیه لجن در سیستم هایی که دارای زمان ماند کوتاه می باشند، هزینه کل سرمایه گذاری سنگین است و حجم لجن در مایع مخلوط که باید تصفیه شود در مقایسه با حجم BOD پایین است.

بنابراین نظارت بر کیفیت فاضلاب ورودی و میزان لجن در لاگون هوادهی جهت کنترل دقیق لجن در لاگون ضروریست. همچنین با توجه به عمر کوتاه لجن در این لاگوتهای، زمان کافی برای تجزیه لجن وجود ندارد این امر باعث ایجاد حجم بالای لجن اضافی و در نتیجه تولید بوی نامطبوع می گردد. این مسائل را می توان با تجهیزات کنترل بو، هاضم های لجن و مخازن ذخیره لجن برطرف کرد ولی هزینه سرمایه گذاری برای این تجهیزات به شدت افزایش می یابد. سیستم BIOLAC با انگیزه به حداقل رساندن هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری و در عین حال به حداکثر رساندن کیفیت پساب خروجی طراحی شده است. از طریق تجزیه و تحلیل دقیق و طراحی تجهیزات لازم، راهکار مناسب برای دستیابی به نتایج مطلوب از طریق فرآیند بیولوژیکی ساده توسعه یافته است. با توجه به حجم لجن و محدودیت ۲۰۰۰-۵۰۰۰ میلی گرم در لیتر مایع مخلوط، احداث لاگون های بزرگ برای حفظ حجم مورد نیاز ضروری است ولی احداث لاگوتهای بتنی در ابعاد قابل توجه امری پر هزینه و پیچیده است. سیستم هوادهی BIOLAC از یک نوع هواده با حباب ریز بسیار مؤثر بهره می جوید که هوا را در فاصله کم (۳۰۰ میلیمتر) از کف لاگون تأمین می نماید. هواده ها به زنجیره هوادهی متصل هستند و در محدوده مشخص لاگون حرکت می کنند. لاگون دارای چند زنجیره هوادهی است که با حرکت ملایم در آن از خوردگی دیواره و کف لاگون جلوگیری کرده و با تضمین اختلاط کامل مصرف انرژی را به حداقل می رسانند. به رغم ابعاد گسترده، ساخت لاگون با پوشش مناسب امری آسان، کم هزینه و کاملاً سازگار با فضای محیط می باشد.

- بهره گیری اقتصادی از فضای موجود

به رغم اینکه در مقایسه با سیستم های کوچک، لاگوتهای هوادهی سیستم BIOLAC وسیع می باشند ولی مساحت کل تصفیه خانه برابر و یا حتی کمتر از سیستم های تصفیه متعارف می باشد که دلیل آن موارد ذیل است:

✓ سیستم BIOLAC نیاز به پیش زلال سازی ندارد.

✓ سیستم BIOLAC نیاز به تصفیه جداگانه لجن ندارد.

✓ زلال سازی در لاگون هوادهی انجام می شود.

✓ هیچگونه محدودیت برای طراحی ابعاد و محل احداث لاگون وجود نداشته و بنابراین بهره گیری از زمین به نحوه بهینه صورت می گیرد [۱۱].

- تصفیه ساده و کم هزینه لجن

فرآیند هوادهی طولانی در سیستم BIOLAC سبب شده تا حجم لجن تولیدی در مقایسه با سایر فرآیندها کمتر باشد. بعد از فرآیند نیز لجن نیاز به تثبیت ندارد و این امر منجر به کاهش هزینه تصفیه لجن شده است. لجنی که فرآیند تصفیه را در سیستم BIOLAC انجام می دهد چندین هفته عمر دارد، در حالی که در فرآیندهای دیگر از لجنی استفاده می شود که تنها چند روز عمر دارند. عمر لجن برابر است با مدت زمان مورد نیاز برای دو برابر ساختن حجم لجن در لاگون هوادهی با بار ثابت بنابراین تغییر در بارگذاری سیستم BIOLAC نیاز به تغییر سرعت حذف لجن ندارد.

در فرآیند BIOLAC لجن اضافی معمولاً از لاگون هوادهی به حوضچه لجن با پوشش مناسب انتقال می یابد. ظرفیت این حوضچه معادل یک سال تولید لجن اضافی طراحی شده که در آن غلظت لجن تا میزان ۵-۷٪ مواد خشک جامد رسیده و بدین ترتیب حمل آن برای استفاده به عنوان کود در کشاورزی توسط تانکر آسان است. چون لجن در لاگون هوادهی به طور کامل تثبیت می شود، به هیچ وجه فاسد نشده، در دراز مدت پس از ذخیره تولید بوی نامطبوع نکرده و نیاز به مراحل کمپوست سازی و یا آهک زنی ندارد. این امر منجر به صرفه جویی نهایی در هزینه کل فرآیند می شود.

۱-۵- وضعیت مصرف انرژی در تصفیه خانه های فاضلاب

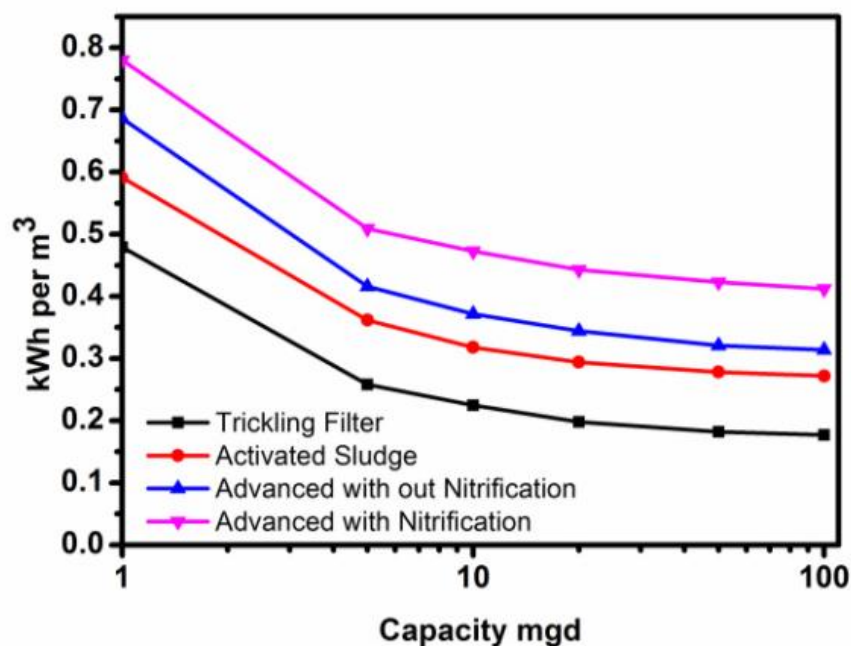
فناوری های تصفیه آب و فاضلاب ضامن تأمین نیازهای انسان در سطح جهانی می باشد به طوری که حتی می تواند مشکلات مربوط کشاورزی در بعضی از نقاط را حل کند. با این حال تصفیه کارای فاضلاب های شهری و صنعتی یکی از ملزومات اساسی در مدیریت کیفیت آب در همه مناطق می باشد که این موضوع با توجه به کاهش آب های در دسترس و افزایش جمعیت اهمیت بیشتری پیدا می کند. کاهش مصرف انرژی برای تصفیه فاضلاب ها یک هدف جهانی است. مطابق با گزارش های اعلام شده میزان مصرف انرژی تصفیه خانه های فاضلاب ۱۰٪ از کل انرژی مصرفی در دنیا و در حدود ۳٪ از مصرف برق انرژی آمریکا را شامل می شود که با توجه به افزایش جمعیت جهانی و استانداردهای زیست محیطی انتظار می رود که این میزان افزایش پیدا کند. از طرفی فعالیت های انسانی و تأثیر آن بر محیط زیست به علت مصرف انرژی و به طبع آن تغییرات اقلیمی یکی از

موضوعات مطرح در سطح جهانی می‌باشد. با توجه به مقررات زیست‌محیطی، به‌طور عرف هدف اصلی از ساخت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کنترل کیفیت پساب‌های خروجی از آن‌ها بوده و بازدهی انرژی در آن‌ها مطرح نبوده است. انرژی موردنیاز یک تصفیه‌خانه بستگی به موقعیت مکانی، اندازه تصفیه‌خانه، نوع فرایند مورد استفاده و سیستم هوادهی، الزامات پساب خروجی، عمر تصفیه‌خانه و تجربه در مدیریت و راهبری تصفیه‌خانه دارد [۸].

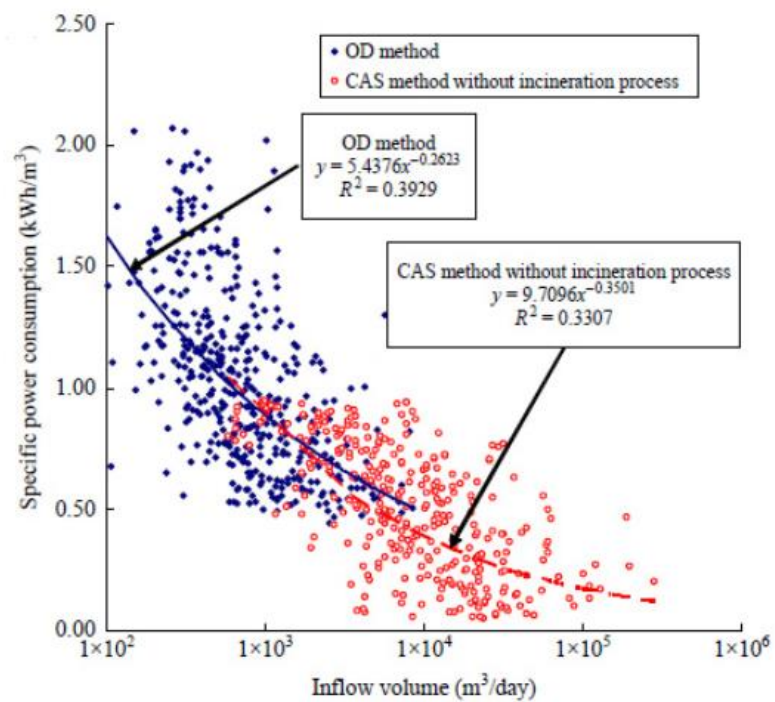
یک تصفیه‌خانه فاضلاب می‌تواند شامل مراحل اولیه، ثانویه و پیشرفته باشد. در تصفیه اولیه میزان مصرف انرژی برای جمع‌آوری فاضلاب و پمپاژ آن در حدود 0.1 تا 0.02 kwh/m^3 در کانادا، 0.14 تا 0.045 kwh/m^3 در بلغارستان و 0.37 تا 0.1 kwh/m^3 در استرالیا گزارش شده است [۱۰، ۱۱]. همچنین میزان متوسط مصرف انرژی در یک سیستم لجن فعال متعارف 0.46 kwh/m^3 در استرالیا، 0.269 kwh/m^3 در چین، 0.6 تا 0.33 در آمریکا و 1.89 تا 0.3 kwh/m^3 در ژاپن برآورد شده است. واحد هوادهی در تصفیه ثانویه بیشترین مقدار انرژی مصرفی در تصفیه‌خانه را دارا است. در بسیاری از تصفیه‌خانه‌های متوسط و بزرگ با سیستم لجن فعال متعارف، هوادهی در حدود 50 تا 60% از برق مصرفی از تصفیه‌خانه را به خود اختصاص می‌دهد درحالی‌که تصفیه لجن در حدود 15 تا 25% از برق مصرفی کل را مصرف می‌کند و در ادامه تانک ته‌نشینی ثانویه که دارای پمپ می‌باشد مصرف برق آن در حدود 15% از برق کل مصرفی است [۱۲-۱۴]. در تصفیه پیشرفته فاضلاب که به علت حذف مواد مغذی صورت می‌گیرد، فرایندهای مورد استفاده به نسبت مصرف انرژی بالایی دارند. به‌صورتی که مصرف انرژی در آن‌ها از 0.39 تا 3.74 kwh/m^3 در ژاپن گزارش شده است [۱۵].

از طرفی دیگر اندازه تصفیه‌خانه‌ها در مصرف انرژی تأثیر زیادی دارند. تغییرات برق مصرفی در اندازه‌های مختلف تصفیه‌خانه در شکل (۱-۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود میزان مصرف برق فرایندهای تصفیه‌خانه با افزایش اندازه آن تغییر می‌کند. شکل (۱-۱۱) و شکل (۱-۱۲) نشان دهنده میزان مصرف انرژی در روش OD^1 در مقایسه با روش لجن فعال در ژاپن است [۱۶].

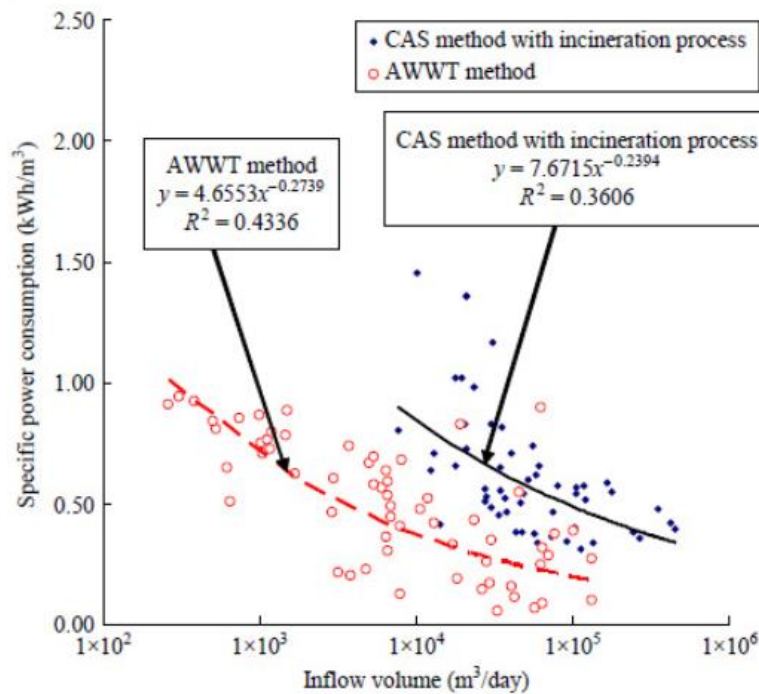
¹ Oxidation patch



شکل (۱۴-۱) تغییرات مصرف برق در فرایندهای مختلف تصفیه فاضلاب [۱۷]



شکل (۱۵-۱) میزان مصرف انرژی در روش OD و لجن فعال بدون فرایند سوزاندن در ژاپن [۱۶]



شکل (۱۶-۱) میزان مصرف انرژی در فرایند لجن فعال همراه با سوزاندن و تصفیه پیشرفته فاضلاب [۱۶]

۱-۶- بررسی اجمالی وضعیت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در ایران

کمتر از ۴۰ درصد از کل جمعیت ایران دارای تصفیه‌خانه‌هایی کامل هستند. متداول‌ترین روشی که برای هضم لجن‌ها استفاده می‌شود هضم بی‌هوازی و هوازی است. استفاده از لاگون، تبدیل لجن به کمپوست و دفن در زمین^۱ از روش‌های مورد استفاده بعدی هستند. در کشور ایران از زمان‌های گذشته تا به امروز از لجن هضم شده به‌عنوان کود در کشاورزی استفاده می‌شود. تا قبل از انقلاب اسلامی تقریباً هیچ تصفیه‌خانه فاضلابی در ایران وجود نداشت. تلاش عمده‌ای در دهه ۱۹۹۰ میلادی برای احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب انجام شد. در سال ۲۰۰۱، ۳۹ تصفیه‌خانه فاضلاب مورد بهره‌برداری قرار گرفت که جمعیتی بالغ بر حدود ۴ میلیون نفر را تحت پوشش قرار می‌داد. در سال ۲۰۱۰ کشور ایران دارای ۱۲۹ تصفیه‌خانه فاضلاب شهری است که جمعیتی بالغ بر ۱۳ میلیون نفر را پوشش می‌دهد که در جدول (۱-۲) آورده شده است.

¹ landfill

جدول (۳-۱) تعداد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و جمعیت تحت پوشش [۱۸]

Year	Length (km)	No. of WWTP	Population Served
1997	9978	30	1,959,548
2000	15654	37	2,327,702
2005	23473	84	6,001,322
2010	35500	129	12,977,079

تصفیه‌خانه‌های موجود در ایران عمدتاً از روش بیولوژیکی برای تصفیه ثانویه استفاده می‌کنند. ۵۱ تصفیه‌خانه از روش لجن فعال، ۴۱ تصفیه‌خانه از روش حوضچه‌های فصلی و ۳۳ تصفیه‌خانه از روش حوضچه‌های هوادهی استفاده می‌کنند. از میان ۱۰۰۰ شهر در ایران تنها ۲۰۰ شهر دارای شبکه جمع‌آوری فاضلاب مورد بهره‌برداری، طراحی شده و یا در حال ساخت می‌باشد [۱۸].

جدول (۴-۱) وضعیت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در ایران [۱۸]

Row	Name of Water and Wastewater Company	No. Treatment Plants	Population Coverage by WWTP (Person)	Total Treatment Plant Capacity (m ³ /day)			Processes
				Design Capacity	Constructed Capacity	Operating Capacity	
1	East Azarbaijan	7	1,288,627	239,647	239,647	198,046	AS(6), AS+SBR(1)
2	West Azarbaijan	6	884,957	405,820	181,820	129,937	AL(5), SBA
3	Istahan	20	2,428,210	757,120	757,120	449,219	AS(4), AL(8), L(8)
4	Ardebil	3	178,913	48,300	48,300	27,933	AS(2), AL(1)
5	Alborz	1	80,000	168,000	42,000	15,000	L(1)
6	Ahvaz	1	194,000	52,000	52,000	36,000	AS(1)
7	Ilam	4	145,688	72,000	36,200	21,279	AL(1), L(3)
8	Bushehr	3	154,617	125,500	41,833	34,009	L(3)
9	Tehran	9	2,778,853	988,890	540,330	430,159	AS-TF(2), AS EA(6), AS(1)
10	Chahar Mahal	5	298,129	97,700	54,700	49,314	AS(4), AL
11	North Khorasan	2	125,748	15,600	13,600	14,100	AS, L
12	Razavi Khorasan	4	292,400	52,900	52,900	39,400	AS(1), L(3)
13	South Khorasan	1	45,741	10,500	10,500	7,010	L
14	Khozestan	5	94,956	59,100	47,511	24,711	L(4), AL(1)
15	Zanjan	2	123,708	73,353	39,916	6,505	AS, L
16	Semnan	3	74,400	76,943	76,943	11,200	AL(2), L(1)
17	Sistan & Baluchestan	2	156,000	175,148	68,600	18,400	AS, L
18	Shiraz	1	432,000	80,352	80,352	60,480	AS
19	Fars	2	68,800	60,440	18,100	4	AL(2)
20	Qom	2	189,100	69,000	69,000	47,000	AS, AL
21	Qazvin	3	209,842	168,468	46,996	31,353	L(3)
22	Lorestan	4	391,314	254,000	188,000	128,000	L, AS, AL, ANL
23	Kordestan	2	412,249	131,360	115,360	115,360	L, AS
24	Kerman	1	61,000	105,000	15,500	6,900	AS
25	Kermanshah	7	589,514	90,610	90,610	88,694	W(1), AS(4), L(2)
26	Kohgloyeh	1	60,983	44,000	44,000	13,000	AL
27	Golestan	3	29,380	29,200	15,900	9,920	L(2), AS
28	Gilan	2	15,830	31,600	21,600	3,353	AS(2)
29	Mazandaran	5	40,600	189,136	45,736	8,036	AS(4), L(1)
30	Markazi	9	383,441	78,734	78,734	83,160	L(5), AS(4)
31	Mashhad	3	525,000	100,200	100,200	102,000	AL(1), L(2)
32	Hormozgan	1	100,000	117,504	117,504	35,000	AS
33	Hamedan	3	36,087	39,636	39,636	12,624	AS, AL, L
34	Yazd	1	67,104	16,650	16,650	10,066	L
Total		129	12,977,079	5,011,120	3,371,327	2,425,327	

فصل ۲: مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- مروری بر کارهای پیشین

Barati و دیگران [۱۹] یک مطالعه جامع از لحاظ انرژی برای یک موتور گاز که با استفاده از سوخت بیوگاز تولید شده از یک هاضم بی‌هوازی تأمین می‌شود انجام داده اند. ضایعات مورد استفاده برای این هاضم بی‌هوازی از نوع پسماندهای شهری می‌باشد. برای انجام این تحقیق داده‌های موردنیاز از سایت نیروگاه بی‌هوازی در تهران جمع‌آوری شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که انرژی موجود در مواد آلی هضم شده در حدود $8758/3 \text{ kW}$ می‌باشد درحالی‌که مقدار انرژی کار مصرفی در حدود 1596 kW به‌دست‌آمده است. همچنین بازده کلی انرژی برای سایت در حدود 73% محاسبه شده است.

Silvestre و دیگران [۲۰] پنج تصفیه‌خانه فاضلاب در اسپانیا را مورد بررسی قرار داده است. با توجه به اطلاعات جمع‌آوری‌شده از این تصفیه‌خانه‌ها و مقدار بیوگاز تولید شده در آن‌ها مشخص شده که هرچه میزان آلودگی فاضلاب تصفیه‌خانه‌ها کمتر باشد میزان تولید بیوگاز نیز کمتر است.

Di Fraia و دیگران [۲۱] آنالیزی ترمو اقتصادی برای یک سیستم تولید هم‌زمان نوین در تصفیه‌خانه فاضلاب انجام داده است. هدف از این تحقیق به دست آوردن انرژی موردنیاز برای مرحله خشک‌کردن لجن در تصفیه‌خانه می‌باشد. با توجه به اینکه بیوگاز تولیدی برای خشک‌کردن لجن کافی نیست استفاده مستقیم از گازهای احتراق خروجی از CHP به همراه استفاده از گاز سنتز حاصل از گازی سازی لجن و روغن‌های زائد مورد بررسی قرار گرفته است.

Ofori-Boateng و دیگران [۲۲] پسماندهای شهری در کشور غنا را مورد مطالعه قرار داده اند. با توجه به مشکل کشور غنا در مدیریت پسماندهای جامد، روش‌های دفن در زمین^۱ و یا سوزاندن ضایعات برای غلبه بر این مشکل ارزیابی شده است. سایت‌های دفن در زمین در حال ساخت در این کشور دارای پتانسیل تولید قدرت در حدود ۱ تا ۲ مگاوات می‌باشند که در کنار توسعه مدیریت ضایعات منجر به ایجاد یک منبع پایدار تولید انرژی نیز می‌شوند.

Abusoglu و دیگران [۲۳] یک آنالیز ترمودینامیکی بر روی یک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری در ترکیه انجام داده اند. فرایندهای تصفیه‌خانه بر مبنای پارامترهای انرژی و انرژی مدل شده تا کارایی سیستم تصفیه‌خانه فاضلاب مورد تحلیل قرار بگیرد. در این مطالعه تصفیه‌خانه به دوش بخش تقسیم شده و آنالیزهای موردنیاز به‌صورت جداگانه و در دو حالت به‌دست‌آمده است. بازده انرژی برای تصفیه اولیه و تصفیه ثانویه به

¹ Landfil

ترتیب در حدود ۵۷ و ۳۰٪ تعیین شده است.

Fitzsimons و دیگران [۲۴] به بررسی بازدهی ترمودینامیکی در تصفیه‌خانه‌ها فاضلاب شهری در کشور ایرلندی پرداخته‌اند. در این مقاله با توجه به لزوم رعایت استاندارد پساب خروجی تصفیه‌خانه‌ها و پیش‌بینی بالا رفتن این استانداردها در آینده نیاز به تصفیه پساب‌ها برای جلوگیری از انتشار آلودگی‌های ناشی از آن در محیط‌زیست افزایش می‌یابد که این افزایش مراحل تصفیه منجر به افزایش مصرف انرژی خواهد شد. این مقاله با هدف دستیابی به یک معیار برای ارزیابی انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌پردازد. نتایج نشان داد که بازدهی انرژی در تصفیه‌خانه اول در حدود ۲۸٪ و در تصفیه‌خانه دوم در حدود ۴۰٪ می‌باشد.

Piadeh و دیگران [۲۵] به بررسی بازچرخانی و استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده در شهرک‌های صنعتی در ایران پرداخته‌اند. در حال حاضر ۲۰٪ از فاضلاب تصفیه شده در شهرک‌های صنعتی برای آبیاری و در تنها ۰/۸۱٪ برای مصارف صنعتی استفاده می‌شود. در این تحقیق یک نگاه کلی به وضعیت مدیریت فاضلاب در شهرک‌های صنعتی شده است تا بتوان به یک نتیجه اقتصادی برای استفاده از مجدد از پساب‌های تصفیه شده در بخش‌های آبیاری و صنعتی رسید.

Saghafi و دیگران [۲۶] مصرف انرژی تصفیه‌خانه فاضلاب در شهرک صنعتی نصیرآباد ارزیابی کرده‌اند. سیستم مورد استفاده در این تصفیه‌خانه از نوع ^۱UABR بوده که با فرایند لجن فعال ^۲IFAS ترکیب شده است. میزان مصرف برق تصفیه‌خانه از صورت حساب پرداخت قبوض برق در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان داد که نرخ مصرف انرژی سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ برای حذف هر کیلوگرم ^۳COD به ترتیب ۴/۹ kWh/d و ۵/۱ بوده است.

Ozdil و دیگران [۲۷] یک موتور بیوگاز در یک تصفیه‌خانه فاضلاب در ترکیه از منظر انرژی و انرژی اقتصادی را مطالعه کرده‌اند. سیستم شامل یک کمپرسور، توربین، پمپ و ۴ مبدل حرارتی و یک موتور گاز است که تأثیر هر کدام از این اجزا بر روی بازده انرژی ارزیابی شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشترین تخریب انرژی در موتور گاز روی داده و مقدار آن در حدود ۴۰۵۵ kW می‌باشد.

Lee و دیگران [۲۸] تحقیقی با هدف بهینه‌سازی یک روش طراحی برای به حداکثر رساندن یک سیستم تولید هم‌زمان در تصفیه‌خانه انجام داده‌اند. سیستم مورد نظر بر اساس ارزیابی‌ها ترمودینامیکی-زیست‌محیطی-

^۱ Up-flow anaerobic baffled reactor

^۲ Fixed bed activated sludge

^۳ Chemical oxygen demand

اقتصادی مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که نرخ هزینه کل و تأثیرات محیط‌زیستی به ترتیب در حدود ۱۷ و ۵٪ کاهش می‌یابد. همچنین انرژی تولید شده در سیستم تولید هم‌زمان می‌تواند در حدود ۴۷٪ انرژی مصرفی تصفیه‌خانه را تأمین کند.

Hao و دیگران [۲۹] به بررسی بازیافت انرژی حرارتی از فاضلاب بجای بازیافت در حالت شیمیایی (متان) پرداخته‌اند. در این مطالعه نشان داده شده است که تنها ۱۰ انرژی فاضلاب به‌صورت شیمیایی بازیافت می‌شود درحالی‌که بازیافت انرژی به‌صورت حرارتی میزان بازیافت را تا ۹۰٪ افزایش می‌دهد. این انرژی حرارتی می‌تواند برای سیستم‌های حرارتی و برودتی، کشاورزی گلخانه‌ای و حتی خشک کردن لجن آبگیری شده بکار رود. از محدودیت استفاده از این فرم از انرژی می‌توان به فاصله زیاد مراکز تولید از مصرف و همچنین سیاست دولت‌ها اشاره کرد.

Madeira و دیگران [۳۰] آنالیز انرژی و اقتصادی برای تولید بایوهیدروژن در یک تصفیه‌خانه فاضلاب برزیل انجام داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بازده انرژی در حدود ۷۹٪ درصد بوده که در مقایسه با نتایج سایر تحقیقات مناسب می‌باشد. همچنین امکان‌سنجی اقتصادی برای سرمایه‌گذاری و تولید هیدروژن انجام شده که نشان می‌دهد هزینه تولید هیدروژن ۰/۱۳ دلار به ازای هر کیلووات ساعت است. همچنین زمان بازگشت سرمایه در حدود ۷ سال به‌دست‌آمده است.

Abusoglu و دیگران [۳۱] یک آنالیز ترمو اقتصادی بر روی یک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری به انجام رسانده‌اند. نحوه راهبری این تصفیه‌خانه توضیح داده شده و یک روش ترمو اقتصادی بر مبنای روابط انرژی اقتصادی برای این تصفیه‌خانه استفاده شده است. فاضلاب ورودی این تصفیه‌خانه روزانه ۲۲۲۰۰۰ مترمکعب بوده و تصفیه اولیه و ثانویه بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد. لجن فعال تولید شده توسط هاضم بی‌هوازی تخریب شده و به ازای یک مترمکعب بیوگاز در حدود ۶۸ کیلو لجن با درصد مواد جامد ۵٪ هضم می‌گردد. بازده واقعی انرژی برای این تصفیه‌خانه در حدود ۳۴٪ به‌دست‌آمده که نشان می‌دهد ۶۶٪ از کل انرژی ورودی که شامل فاضلاب و کار مصرفی می‌باشد تخریب می‌گردد.

Tamjidi و Chahartaghi [۳۲] به بررسی ترمودینامیکی و اقتصادی استفاده از سیستم‌های تولید هم‌زمان در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در ایران پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که در تصفیه‌خانه‌های با ظرفیت بالا استفاده از سیستم‌های تولید هم‌زمان توجیه اقتصادی بیشتری دارد. همچنین با توجه به اینکه اندازه سیستم‌های تولید هم‌زمان به میزان تولید بیوگاز تولید شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بستگی دارد، راهبری بهتر هاضم‌های بی‌هوازی و افزایش ظرفیت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب منجر به افزایش تولید بیوگاز می‌شود و این

امر می‌تواند دوره بازگشت سرمایه را کاهش دهد.

Khounani و دیگران [۳۳] برای پیدا کردن مکان اصلی انرژی برای پالایشگاه نوعی گل رنگ دهنده انجام داده اند. پالایشگاه شامل ۶ واحد بوده و نرخ انرژی برای تمامی نقاط محاسبه شده است. نتایج نشان داده است که واحد تصفیه خانه پالایشگاه بیشترین نرخ تخریب انرژی را داشته که بیش از ۷۰٪ کل بازگشت ناپذیری ها می شود. (در حدود ۱۲۱۴۰ کیلووات)

Madeiraa و دیگران [۳۴] پتانسیل تولید هیدروژن از تصفیه خانه ای مربوط به نوعی گیاه نشاسته دار را مطالعه کرده اند. در این تصفیه خانه تولید هیدروژن با توجه به درصدهای مختلف متان در چندین بیوگاز مختلف بررسی شده است. نتایج نشان داده است که نرخ جهانی بازدهی انرژی با درصد متان ۷۰٪ در حدود ۷۳٪ می باشد.

Fria و دیگران [۳۵] یک آنالیز انرژی اقتصادی برای سیستم زمین گرمایی به منظور تامین برق و حرارت در تصفیه خانه فاضلاب و لجن پرداخته اند. نتایج نشان می دهد که کمترین بازدهی انرژی مربوط به واحد خشک کننده حرارتی می باشد که مقدار آن در حدود ۱۹ تا ۲۳٪ به دست آمده است. همچنین با افزایش دمای زمین گرمایی عملکرد سیستم و هزینه تولید برق بهبود می یابد.

۲-۲- معرفی کار حاضر

با افزایش جمعیت کشورها و افزایش سرانه مصرف آب ، میزان تولید فاضلاب در سطح دنیا افزایش پیدا کرده است. به منظور کاهش آلودگی زیست محیطی ، تصفیه خانه های فاضلاب متعددی در همه کشورها ساخته شده است. با افزایش تعداد تصفیه خانه های فاضلاب مشخص گردید که تصفیه فاضلاب انرژی زیادی را مصرف می کنند. با توجه به آنکه این لجن ها به صورت دائمی در تصفیه خانه تولید می گردند، تصفیه خانه های فاضلاب به یک منبع تولید انرژی تجدید پذیر تبدیل شده اند که با بهینه سازی بازیافت انرژی در آن می توان، همه یا بخش بزرگی از انرژی مورد نیاز تصفیه خانه را تأمین نمود. همانطور که مشاهده می شود تحقیقات بسیاری برای ارزیابی و بهینه سازی مصرف و تولید انرژی در تصفیه خانه ها صورت گرفته است. در تحقیقات پیشین یک آنالیز کلی از انرژی برای تصفیه خانه های فاضلاب به انجام رسیده و یا تحلیل انرژی فقط بر مبنای تجهیزات مکانیکی بکار رفته در تاسیسات بوده است در صورتی که در تحقیق پیش رو تمامی واحدها از منظر انرژی مورد مطالعه قرار گرفته اند. از طرف دیگر، انرژی جریان های فاضلاب در تمامی نقاط تصفیه خانه بدست آمده و یک مقایسه

ای برای پارامترهای کلیدی مانند نرخ اگزرژی کار، بیوگاز تولید شده و لجن آبیگری شده انجام شده است. همچنین در تحقیقات پیشین معمولاً تنها بر روی یک تصفیه خانه مطالعه انجام می گرفت در صورتی که در این رساله ۷ تصفیه خانه مختلف از منظر اگزرژی مطالعه شده اند. به بیان دیگر در این تحقیق به ارزیابی تغییرات اگزرژی موجود در فاضلاب خام ورودی به تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران پرداخته شده است. بدین منظور در ابتدا روابط مورد استفاده در این کار معرفی شده اند. سپس با توجه به داده های گردآوری شده برای تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران، اگزرژی با توجه به موازنه جرمی و اگزرژی فیزیکی و شیمیایی برای تمامی نقاط تصفیه خانه فاضلاب به دست آمده است. سپس با استفاده پارامترهای معرفی شده بازده اگزرژی واحدهای تصفیه خانه به دست آمده است نشان داده شده است که کدام واحدها از لحاظ بازدهی از اگزرژی دارای وضعیت مطلوب تری هستند. در ادامه میزان تخریب اگزرژی هر واحد به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شده اند. همچنین با استفاده دیاگرام گراسمن ، جریان اگزرژی در تصفیه خانه شرح داده شده است.

در ادامه ۶ تصفیه خانه فاضلاب دیگر نیز به صورت کلی از منظر اگزرژی مورد بررسی قرار گرفته اند. هر کدام از این تصفیه خانه ها دارای ظرفیت بهره برداری متفاوتی هستند و پارامترهای فاضلاب آن ها از یکدیگر متمایز است. این بررسی ها شامل اگزرژی ورودی و خروجی از تصفیه خانه ها، بررسی تغییرات این پارامترها در جریان فرایندهای تصفیه خانه می باشد و همچنین مقایسه هایی بین اگزرژی کار مصرفی، فاضلاب ورودی، پساب، لجن آبیگری شده، بیوگاز و اگزرژی تخریب شده در راکتور هوادهی به انجام رسیده است.

فصل ۳: توصیف سیستم و معادلات حاکم

۳-۱- تصفیه‌خانه فاضلاب تهران

تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران که در شهری ، اتوبان شهید آوینی مجاور روستای عمادآور واقع می‌باشد برای تصفیه بخشی از فاضلاب تهران در ۸ مدول به ظرفیت ۴۲۰۰۰۰۰۰۰ نفر پیش بینی شده است. چهار مدول ساخته شده فعلی هرکدام جمعیتی معادل ۵۲۵۰۰۰ نفر را پوشش داده و جریانی معادل ۴۵۰۰۰۰ مترمکعب در روز را می‌تواند جهت تصفیه پذیرش نماید. نواحی تحت پوشش این تصفیه‌خانه فاضلاب‌های جمع‌آوری شده از شمال و شمال شرق شهر بوده و از دو ورودی شرقی و غربی تصفیه‌خانه دریافت می‌گردد. زمین تصفیه‌خانه به مساحت ۱۱۰ هکتار و با شیبی از شمال به جنوب ، از تراز ۱۰۳۵ الی ۱۰۲۰ واقع شده است. نوع فرآیند تصفیه فاضلاب از نوع لجن فعال همراه با حذف نیتروژن است و پساب تصفیه شده آبیاری زمین‌های کشاورزی دشت ورامین را تأمین خواهد کرد. چند نما از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران در شکل‌های (۳-۱) تا (۳-۳) نشان داده شده‌اند. همچنین شماتیکی از تصفیه‌خانه در شکل (۳-۴) نمایش داده شده است.



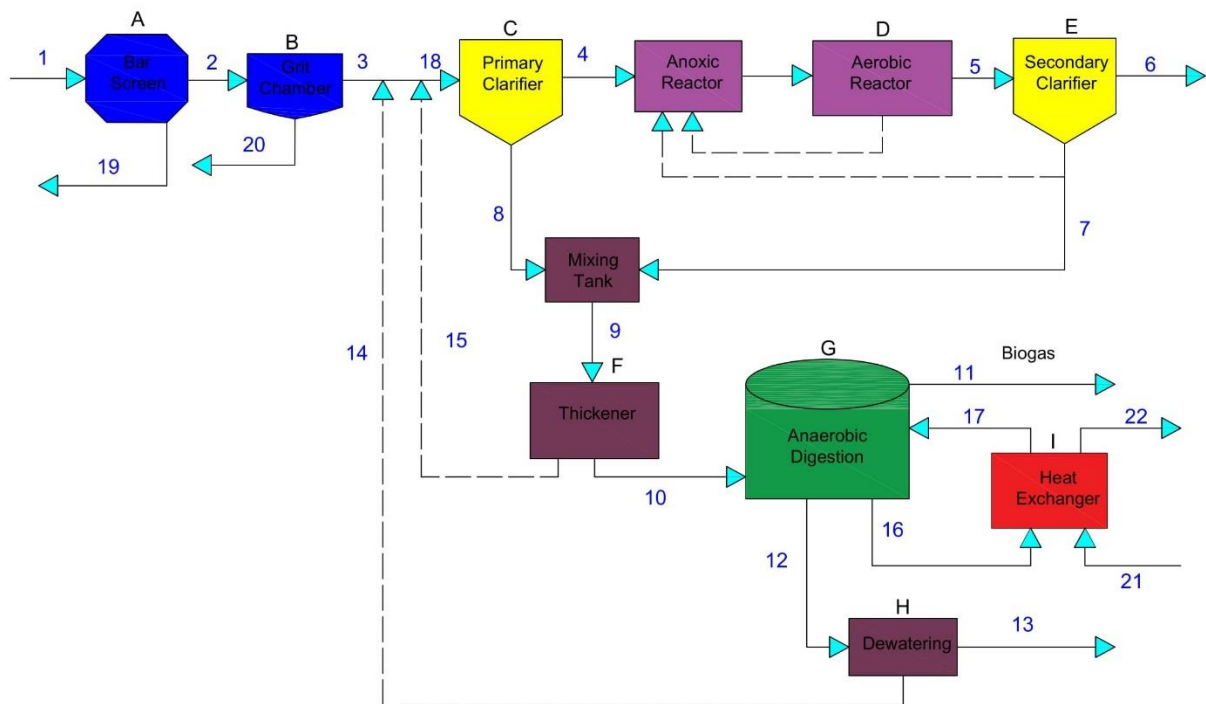
شکل (۱-۳) نمای اول از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران



شکل (۲-۳) نمای دوم از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران



شکل (۳-۳) فرایند آبگیری در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران



شکل (۳-۴) شماتیکی از فرایندهای تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران

۳-۱-۱- شرح فرایندها در تصفیه‌خانه فاضلاب

هدف تصفیه اولیه حذف مواد جامد از فاضلاب ورودی می‌باشد. در تصفیه ثانویه که معمولاً شامل تصفیه بیولوژیکی^۱ می‌باشد مواد محلول آلی موجود در فاضلاب ورودی توسط میکروارگانیسم‌ها مصرف شده و تبدیل به مواد زیست‌توده^۲ می‌گردد که این مواد زیست‌توده قابلیت ته‌نشینی و جداسازی دارند. سیستم‌های تصفیه ثانویه لجن مازاد^۳ تولید می‌کنند که این لجن قابلیت تجزیه توسط سایر میکروارگانیسم‌ها را دارا می‌باشد. لجن مازاد

^۱ Biological treatment

^۲ biomass

^۳ Excess sludge

معمولاً با لجن اولیه که در تصفیه اولیه تولید می‌شود ترکیب می‌گردد و برای تصفیه بیشتر به واحدهای تصفیه بعدی منتقل می‌شود. فرایند بی‌هوازی^۱ یکی از فرایندهای مورد استفاده در تصفیه ثانویه است که در نتیجه آن بخشی از لجن تولید شده به گازهایی از قبیل متان و کربن دی‌اکسید تبدیل شده و مابقی به‌عنوان مواد مایع و جامد هضم شده باقی می‌ماند. در بسیاری از موارد تصفیه اولیه و ثانویه برای رساندن کیفیت پساب به حد استاندارد کافی می‌باشد. هرچند که در بعضی موارد، فرایندهای تصفیه بیشتری برای کاهش بیشتر آلودگی‌ها از فاضلاب موردنیاز می‌شود که از آن به‌عنوان تصفیه پیشرفته نام برده می‌شود.

۳-۱-۲- تحلیل فرایندها در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران

میزان مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌طور چشمگیری با توجه به منطقه جغرافیایی، اندازه تصفیه‌خانه، سطح آلودگی اولیه فاضلاب و نوع فرایندهای بکار رفته در فرایندهای تصفیه بستگی دارد. به‌طور کلی هر چه فرایندهای پیشرفته‌تری برای تصفیه فاضلاب انتخاب شود میزان مصرف انرژی افزایش پیدا می‌کند. بیشترین میزان مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مربوط به پمپ‌ها، دمنده‌ها و سیستم‌های مدیریت مواد جامد می‌باشد. فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه در نقطه ۱ ابتدا وارد فرایند آشغال‌گیری^۲ و سپس در نقطه ۲ وارد فرایند دانه‌گیری^۳ می‌شود اما با توجه به کم بودن مواد زائد میزان مصرف انرژی این فرایند در مقایسه با مصرف انرژی کل تصفیه‌خانه فاضلاب کم است. این مواد زائد در نقاط ۱۹ و ۲۰ از مدار تصفیه خانه خارج می‌شوند. سپس در نقاط ۱۴ و ۱۵ جریان‌های برگشتی از تصفیه خانه به جریان شماره ۳ اضافه شده و در نقطه ۱۸ فاضلاب وارد تانک ته‌نشینی اولیه می‌گردد و بخش زیادی از مواد قابل ته‌نشینی در نقطه ۸ از آن جدا می‌شود که به آن لجن اولیه گفته می‌شود. سپس مابقی فاضلاب در نقطه ۴ وارد تانک هوادهی شده که در آن میکروارگانیسم‌ها با استفاده از مواد محلول و معلق در فاضلاب به‌عنوان ماده غذایی در رشد و نمو پیدا کرده و منجر به کاهش آلودگی فاضلاب می‌گردد (نقطه ۵). این عمل منجر به ایجاد مواد جامد قابل ته‌نشینی شده که در واحد تانک ته‌نشینی ثانویه در نقطه ۷ از فاضلاب جدا می‌شود که اصطلاحاً به آن لجن مازاد گفته می‌شود. جریان ۶ پساب تولیدی در تصفیه خانه است که از مدار تصفیه خانه خارج می‌گردد. سپس لجن اولیه و مازاد تولید شده در تانک ته‌نشینی اولیه و ثانویه با هم مخلوط شده و در نقطه ۹ وارد واحد تغلیظ لجن می‌گردد. در

¹ Anaerobic process

² Screening

³ gritting

این واحد غلظت لجن افزایش پیدا کرده و سپس در نقطه ۱۰ وارد هاضم بی‌هوازی می‌گردد. همچنین مقداری از جریان در نقطه ۱۵ به ابتدای تصفیه خانه برگردانده می‌شود. در هاضم بی‌هوازی از طریق فعالیت‌های میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی لجن هضم شده و به ازای آن بیوگاز تولید می‌گردد (نقطه ۱۱) که بیوگاز تولید شده می‌تواند برای تولید برق، حرارت و سرمایش مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت لجن هضم شده در نقطه ۱۲ از هاضم خارج شده و وارد واحد آبگیری می‌شود. در این واحد لجن بخش زیادی از آب خود را از دست داده و غلظت آن به شدت افزایش می‌کند (نقطه ۱۳). لازم به ذکر است در مرحله آبگیری لجن، آب جدا سازی شده از لجن در نقطه ۱۴ به ابتدای تصفیه خانه برگردانده می‌شود تا عملیات تصفیه مجدداً بر روی آن انجام گیرد.

۳-۱-۳- معرفی پارامترهای تصفیه خانه های فاضلاب

با توجه به ماهیت پیچیده فاضلاب و وجود مواد متفاوت در آن پارامترهای مختلفی برای اندازه‌گیری مشخصه‌های فاضلاب استفاده می‌شود. در ادامه به بررسی مهم‌ترین این پارامترها پرداخته شده است. تمامی پارامترهای زیر بر اساس واحدهای جرمی تعریف می‌شوند و به همین دلیل می‌توان از قوانین بقای جرم برای آن‌ها استفاده نمود.

• BOD^۱

به مقدار اکسیژن محلول مورد نیاز توسط میکروارگانیسم‌های بیولوژیکی هوازی که برای تجزیه مواد آلی موجود در نمونه آب داده شده در دما و زمانی مشخص نیاز دارند، BOD گفته می‌شود. مقدار BOD معمولاً بر واحد میلی گرم اکسیژن مصرف شده در هر لیتر از نمونه داده شده بیان می‌شود و در مدت زمان ۵ روز و در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد اندازه‌گیری می‌شود.

• COD^۲

COD معیاری برای ارزیابی مقدار اکسیژنی که می‌تواند توسط واکنش‌ها در یک محلول مصرف شود می‌باشد. مقدار COD معمولاً بر مبنای جرم اکسیژن مصرف شده در حجم محلول داده شده بیان می‌شود که در واحد SI برابر با $\frac{mg}{L}$ است.

¹ Biochemical Oxygen Demand

² Chemical Oxygen Demand

• TSS^۱

TSS جرم خشک ذراتی است که به وسیله یک فیلتر به دام می‌افتد. TSS یکی از پارامترهایی است که برای ارزیابی کیفیت فاضلاب پس از تصفیه در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۲- توصیف سیستم و معادلات حاکم

۳-۲-۱- ارزیابی ترمودینامیکی

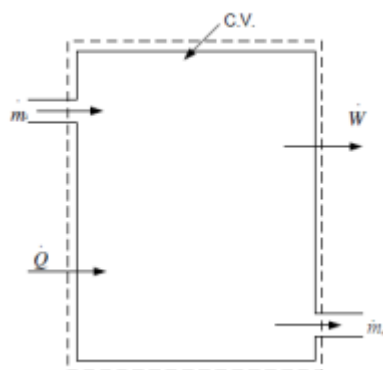
ارزیابی‌های ترمودینامیکی شامل معادلات موازنه جرم، آنترپی، انرژی و آگزرژی می‌شود که در این رساله از ارزیابی آنترپی صرف‌نظر شده است. مابقی معادلات به صورت زیر می‌باشند:

• معادله موازنه جرمی

اصل بقای جرمی یکی از قواعد پایه‌ای در ارزیابی هر سیستم ترمودینامیکی است. این اصل برای یک حجم کنترل تعریف می‌شود که در شکل (۲-۴) نشان داده شده است [۳۶]:

$$\sum_k \dot{m}_i - \sum_k \dot{m}_e = \frac{dm_{cv}}{dt} \quad (۱-۳)$$

که $\dot{m}_i$ و $\dot{m}_e$ به ترتیب جرم و دبی جرمی هستند و اندیس‌های i و e به ترتیب بیانگر ورودی و خروجی به حجم کنترل می‌باشند.



شکل (۳-۵) یک حجم کنترل برای معادله موازنه جرمی [۳۶]

¹ Total Suspended Solids

• معادله موازنه انرژی

معادله موازنه انرژی یک حجم کنترل تمامی انرژی‌های ورودی و خروجی یک حجم کنترل را شامل می‌شود. قانون اول ترمودینامیک که به اصل بقای انرژی معروف است به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۶]:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_i \dot{m}_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i \right) - \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) = \frac{dE_{CV}}{dt} \quad (2-3)$$

که $\dot{Q}$ ، $\dot{W}$ و t به ترتیب انرژی، نرخ انتقال حرارت، نرخ کار و زمان هستند. سایر نمادها یعنی $g.V.h$ و Z بیانگر آنتالپی مخصوص، سرعت، شتاب جاذبه زمین و ارتفاع می‌باشند.

مقدار حرارت موردنیاز برای گرمایش و جبران اتلاف حرارت از طریق سقف، کف و دیوارها به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{Q}_{loss,digester} = \dot{Q}_{roof} + \dot{Q}_{floor} + \dot{Q}_{wall} \quad (3-3)$$

$$\dot{Q}_{roof} = U_{roof} A_{roof} (T_{digester} - T_{avg}) \quad (4-3)$$

$$\dot{Q}_{floor} = U_{floor} A_{floor} (T_{digester} - T_{avg}) \quad (5-3)$$

$$\dot{Q}_{wall} = U_{wall} A_{wall} (T_{digester} - T_{avg}) \quad (6-3)$$

که در رابطه‌های بالا $\dot{Q}_{roof}$ ، $\dot{Q}_{floor}$ و $\dot{Q}_{loss,digester}$ به ترتیب حرارت اتلافی از دیوارها، سقف و کف هاضم و حرارت کل موردنیاز برای هاضم می‌باشد.

کل گرمایش موردنیاز برای هاضم توسط یک مبدل حرارتی تأمین می‌گردد که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_{HX1} = \dot{Q}_{loss,digester} \quad (7-3)$$

$$\dot{m}_{21} C_p (T_{21} - T_{22}) = \dot{m}_{16} C_p (T_{17} - T_{16}) \quad (8-3)$$

در رابطه بالا C_p ظرفیت گرمایی ویژه آب یعنی $\frac{kJ}{kg.k}$ در نظر گرفته می‌شود. U ضریب کلی انتقال

حرارت می‌باشد که با توجه با نوع هاضم و ضخامت دیوارها تعیین می‌شود و برحسب $\frac{kW}{m^2.K}$ بیان می‌شود.

همچنین r و h به ترتیب شعاع و ارتفاع هاضم می‌باشند. حجم هاضم از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$V = G \times SRT \quad (9-3)$$

که در رابطه فوق، SRT^1 زمان ماند مواد جامد در هاضم می‌باشد G نیز، دبی حجمی روزانه لجن است که در تصفیه‌خانه تولید می‌شود.

با توجه به آنکه بیوگاز تولید شده در هاضم حجم اشغال می‌کند مقدار حجم نهایی را به صورت زیر به دست در نظر می‌گیریم:

$$V_{final} = V + 0.15V \quad (10-3)$$

شکل هاضم به صورت استوانه در نظر گرفته شده است. با فرض نسبت شعاع به ارتفاع یکسان، مقادیر آن‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$V = \pi r^2 h \quad (11-3)$$

۳-۲-۲- آنالیز اگزرژی:

آنالیز اگزرژی به توسعه استراتژی‌ها و راهبردها برای دستیابی به بازدهی بیشتر و استفاده کاراتر از انرژی کمک می‌کند و در فرایندهای گرمایی گوناگونی قابلیت استفاده دارد. اگزرژی یک ماده معمولاً به چهار بخش تقسیم می‌شود. دو تای از آن‌ها عبارت‌اند از اگزرژی فیزیکی و شیمیایی. دو تای بعدی عبارت‌اند از اگزرژی جنبشی و پتانسیل که معمولاً در تحلیل‌ها از آن‌ها صرف نظر می‌شود زیرا به طور معمول میزان تغییرات ارتفاع کم و سرعت‌ها هم به نسبت کم می‌باشند. [] اگزرژی فیزیکی به عنوان بیشینه کار قابل دستیابی از طریق کنش با محیط تعریف می‌شود. اگزرژی شیمیایی مربوط به ترکیب شیمیایی سیستم است و نسبت به وضعیت تعادل شیمیایی تعریف می‌گردد. با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک رابطه زیر به صورت نرخ بالانس اگزرژی نوشته می‌شود [۳۷]:

$$\dot{E}x_Q + \sum_i \dot{m}_i ex_i = \sum_e \dot{m}_e ex_e + \dot{E}x_W + \dot{E}x_D \quad (12-3)$$

که در رابطه بالا اندیس‌های i و e به ترتیب جریان‌های ورودی و خروجی از حجم کنترل را نشان می‌دهد. $\dot{E}x_D$ نرخ تخریب اگزرژی است و پارامترهای دیگر به صورت زیر تعریف می‌شوند [۳۸، ۳۹]:

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i \quad (13-3)$$

¹ Solid retention time

$$\dot{Ex}_W = \dot{W} \quad (۱۴-۳)$$

$$ex = ex^{ph} + ex^{ch} \quad (۱۵-۳)$$

در اینجا $\dot{Ex}_Q$ نرخ انرژی ناشی از انتقال حرارت از حجم کنترل نسبت به دمای مطلق (T) و اندیس 0 اشاره به شرایط مرجع محیطی است و $\dot{Ex}_W$ نرخ انرژی مربوط به انجام کار است. همچنین ex_{ph} که در این تحقیق برای محاسبه آب محاسبه می شود به صورت زیر تعریف می شود [۴۰]:

$$ex^{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (۱۶-۳)$$

انرژی شیمیایی مخلوط گازها به صورت زیر تعریف می شود:

$$ex^{ch} = \left[\sum_{i=1}^n x_i ex_i^{ch} + RT_0 \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i \right] \quad (۱۷-۳)$$

انرژی فیزیکی گازها از رابطه زیر محاسبه می شود [۴۱]:

$$ex^{ph} = C_p \left(T - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right) + RT_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (۱۸-۳)$$

معادله بالا نمی تواند برای ارزیابی انرژی سوختها استفاده گردد. برای این منظور از رابطه زیر برای محاسبه انرژی سوختها استفاده می گردد [۳۶]:

$$\xi = \frac{ex_f}{LHV_f} \quad (۱۹-۳)$$

نسبت انرژی شیمیایی به LHV_f برای سوختهای گازی نزدیک به واحد است. این مقدار برای متان برابر است با :

$$\xi_{CH_4} = 1.06$$

با توجه نوع تحقیق انجام شده در این رساله از پارامتر COD برای محاسبه انرژی جریان فاضلاب استفاده شده است. دو رابطه زیر رابطه انرژی جریان فاضلاب بر حسب پارامتر COD را نشان می دهد [۲۴]:

$$ex^{ch} \left(\frac{J}{l} \right) = 13.6 \left(\frac{kJ}{g} \right) \times COD \left(\frac{mg}{l} \right) \quad (۲۰-۳)$$

$$ex^{ch} \left(\frac{J}{l} \right) = 13.7 \left(\frac{kJ}{g} \right) \times COD \left(\frac{mg}{l} \right) - 116 \quad (۲۱-۳)$$

همچنین انرژی فیزیکی جریانهای آلی^۱ از رابطه زیر به دست می آید [۱۹]:

¹ Organic stream

$$ex^{ph} = C_p(T - T_0 - T_0 \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)) \quad (22-3)$$

که در رابطه بالا C_p ظرفیت گرمایی ویژه لجن است که برابر آب فرض می‌شود. با توجه به تحقیقات انجام گرفته پیرامون مقادیر متفاوتی که هر کدام از این روابط نسبت به یکدیگر می‌دهند ، رابطه دوم در مقادیر پایین COD دارای خطای بیشتری می‌باشد. به همین دلیل در این رساله از رابطه اول برای محاسبه اگزرژی جریان‌های فاضلاب استفاده شده است.

از آنجاکه میزان برق مصرفی برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مورد بررسی (به جز تصفیه‌خانه جنوب تهران) در دسترس نیست میزان برق مصرفی برای هر کدام از تصفیه‌خانه‌ها از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۴].

$$SPC = 9.7096Q^{-0.3531} \quad (23-3)$$

در رابطه بالا Q دبی فاضلاب بر حسب مترمکعب بر روز است. همچنین SPC برق مخصوص مصرفی می‌باشد.

۳-۲-۳- معادلات بالانس اگزرژی:

در این قسمت اگزرژی جریان هر کدام از نقاط محاسبه شده و میزان تغییر اگزرژی در واحدها تعیین می‌شود. میزان تخریب اگزرژی در هر کدام از واحدهای تصفیه‌خانه در جدول (۳-۱) آورده شده است. از آنجاکه اگزرژی موجود در جریان‌های فاضلاب مربوط به اگزرژی شیمیایی آن است ، این پارامتر برای تمامی نقاط جریان محاسبه شده و همچنین به علت اینکه در هاضم بی‌هوازی بیوگاز تولید می‌شود که عمده مقدار آن متان است محاسبه اگزرژی متان تولیدی اهمیت بسیاری می‌یابد. اگزرژی شیمیایی معادل است با بیشترین کار قابل استحصال که می‌توان در خلال یک فرایند انتقال حرارت از ماده در شرایط خود تا شرایط مرده گرفت [۴۲].

جدول (۱-۳) معادلات موازنه انرژی واحدهای تصفیه‌خانه فاضلاب تهران

واحد	معادلات موازنه انرژی	
آشغال‌گیری	$\dot{E}x_1^{ch} + \dot{W}_A = \dot{E}x_2^{ch} + \dot{E}x_{19}^{ch} + \dot{E}x_{d,A}$	(۲۴-۳)
دانه‌گیری	$\dot{E}x_2^{ch} + \dot{W}_B = \dot{E}x_3^{ch} + \dot{E}x_{20}^{ch} + \dot{E}x_{d,B}$	(۲۵-۳)
ته‌نشینی اولیه	$\dot{E}x_3^{ch} + \dot{W}_C = \dot{E}x_4^{ch} + \dot{E}x_8^{ch} + \dot{E}x_{d,C}$	(۲۶-۳)
راکتور هوادهی	$\dot{E}x_4^{ch} + \dot{W}_D = \dot{E}x_5^{ch} + \dot{E}x_{d,D}$	(۲۷-۳)
ته‌نشینی ثانویه	$\dot{E}x_5^{ch} + \dot{W}_E = \dot{E}x_6^{ch} + \dot{E}x_7^{ch} + \dot{E}x_{d,E}$	(۲۸-۳)
تغلیظ لجن	$\dot{E}x_9^{ch} + \dot{W}_F = \dot{E}x_{10}^{ch} + \dot{E}x_{15}^{ch} + \dot{E}x_{d,F}$	(۲۹-۳)
هاضم بی‌هوازی	$\dot{E}x_{10}^{ch} + \dot{E}x_{17}^{ph} + \dot{W}_G$ $= \dot{E}x_{11}^{ch} + \dot{E}x_{11}^{ph} + \dot{E}x_{12}^{ch} + \dot{E}x_{12}^{ph}$ $+ \dot{E}x_{16}^{ph} + \dot{E}x_{L,G} + \dot{E}x_{d,G}$	(۳۰-۳)
واحد آب‌گیری	$\dot{E}x_{12}^{ch} + \dot{E}x_{12}^{ph} + \dot{W}_H = \dot{E}x_{13}^{ch} + \dot{E}x_{14}^{ch} + \dot{E}x_{L,H} + \dot{E}x_{d,H}$	(۳۱-۳)
مبدل حرارتی	$\dot{E}x_{16}^{ch} + \dot{E}x_{16}^{ph} = \dot{E}x_{17}^{ph} + \dot{E}x_{22}^{ph} + \dot{E}x_{d,I}$	(۳۲-۳)

بازده انرژی:

در ارزیابی سیستم‌های مختلف، بازده انرژی یک پارامتر مهم به حساب می‌آید. بازده انرژی نسبت بازده انرژی اطلاعات بیشتری را در اختیار قرار می‌دهد که به کمک آن می‌توان سیستم را تحلیل و به توسعه سیستم پرداخت. در تحلیل انرژی دو تعریف برای بازدهی انرژی مطرح شده است [۴۳، ۴۴]:

- بازده انرژی جهانی^۱ که بر اساس نسبت انرژی همه جریان‌های خروجی به ورودی تعریف می‌شود که در رابطه زیر آورده شده است.

$$\eta = \frac{\sum \dot{E}x_{out}}{\sum \dot{E}x_{in}} \times 100 = \left(1 - \frac{\sum \dot{E}x_d}{\sum \dot{E}x_{in}}\right) \times 100 \quad (۳۳-۳)$$

^۱ Universal exergy efficiency

- بازده اگزرژی تابعی^۱ که بر اساس نسبت اگزرژی تولید شده به اگزرژی داده شده تعریف می‌گردد که در جدول (۲-۳) آورده شده است.

جدول (۲-۳) معادلات بازده اگزرژی تابعی واحدهای تصفیه‌خانه فاضلاب تهران

واحد	بازده اگزرژی تابعی	
آشغال گیری	$\psi_A = \frac{\dot{E}x_2^{ch}}{\dot{E}x_1^{ch} - \dot{E}x_{19}^{ch} + W_A}$	(۳۴-۳)
دانه گیری	$\psi_B = \frac{\dot{E}x_3^{ch}}{\dot{E}x_2^{ch} - \dot{E}x_{20}^{ch} + W_B}$	(۳۵-۳)
ته‌نشینی اولیه	$\psi_C = \frac{\dot{E}x_4^{ch}}{\dot{E}x_{18}^{ch} - \dot{E}x_8^{ch} + W_C}$	(۳۶-۳)
راکتور هوادهی	$\psi_D = \frac{\dot{E}x_5^{ch}}{\dot{E}x_4^{ch} + W_D}$	(۳۷-۳)
ته‌نشینی ثانویه	$\psi_E = \frac{\dot{E}x_7^{ch}}{\dot{E}x_5^{ch} - \dot{E}x_6^{ch} + W_E}$	(۳۸-۳)
تغلیظ لجن	$\psi_F = \frac{\dot{E}x_{10}^{ch}}{\dot{E}x_9^{ch} - \dot{E}x_{15}^{ch} + W_F}$	(۳۹-۳)
هاضم بی‌هوازی	$\psi_G = \frac{\dot{E}x_4^{ch}}{\dot{E}x_{10}^{ch} + \dot{E}x_{17}^{ph} - \dot{E}x_{12}^{ch} - \dot{E}x_{12}^{ph} + W_G}$	(۴۰-۳)
واحد آبگیری	$\psi_H = \frac{\dot{E}x_{13}^{ch}}{\dot{E}x_{12}^{ch} + \dot{E}x_{12}^{ph} - \dot{E}x_{14}^{ch} + W_H}$	(۴۱-۳)
مبدل حرارتی	$\psi_I = \frac{\dot{E}x_{17}^{ph} - \dot{E}x_{16}^{ph}}{\dot{E}x_{21}^{ph} - \dot{E}x_{22}^{ph}}$	(۴۲-۳)

میزان تخریب اگزرژی برای هر واحد در تصفیه‌خانه فاضلاب می‌تواند نسبت به اگزرژی تخریب شده در کل تصفیه‌خانه به دست آید و بدین ترتیب می‌توان مشخص نمود که به ترتیب بیشترین تخریب اگزرژی در کدام واحدها رخ می‌دهد.

$$y_{d,i} = \frac{\dot{E}x_{d,i}}{\dot{E}x_{d,total}} \times 100 \quad (۴۳-۳)$$

¹ Functional exergy efficiency

۳-۲-۴- پارامترهای اقتصادی

هدف از ارزیابی اقتصادی، فراهم ساختن برآوردی از هزینه ها و منافع حاصل از هر پروژه در طول زمان بهره برداری از سیستم می باشد و نتیجه آن ممکن است به ادامه پروژه به شکل موجود و بدون هرگونه اصلاح و یا ادامه پروژه با اصلاحات مورد انتظار و یا لغو پروژه منتهی شود.

۳-۲-۴-۱- روش ارزش حال خالص

ارزش خالص فعلی^۱ (NPV) تفاوت بین ارزش فعلی جریانهای نقدی ورودی و ارزش فعلی جریان نقدی خروجی است. از این روش برای بودجه بندی سرمایه استفاده می شود تا احتمال سرمایه گذاری محاسبه شده پروژه را تحلیل کند؛ به عبارت دیگر این روش، جریان نقدینگی آینده را با ارزش حال امروز معادل می کند.

۳-۲-۴-۲- فاکتور تنزیل^۲

ارزش حال (PV) با استفاده از نرخ بهره فرضی که معمولاً یک نرخ تنزیلی خوانده می شود تعیین می گردد. ارزش حال یک جریان نقدینگی آینده از رابطه زیر به دست می آید:

$$PV = Z \times \left(1 + \frac{IR}{100}\right)^{-n} \quad (۴۴-۳)$$

در رابطه بالا Z جریان نقدینگی آتی، IR^۳ نرخ بهره سالیانه و n تعداد سالهای کارکرد می باشد. همچنین می توان محاسبه ارزش حال یک جریان نقدینگی در آینده را با استفاده از فاکتور تنزیل (DF) انجام داد. فاکتور تنزیل بر اساس نرخ بهره است و می توان با استفاده از معادله زیر آن را تعیین کرد.

$$DF = \left(1 + \frac{IR}{100}\right)^{-n} \quad (۴۵-۳)$$

بنابراین، ارزش حال با استفاده از جریان نقدینگی آتی و فاکتور تنزیل به صورت زیر به دست می آید [۴۵]:

$$PV = Z \times DF \quad (۴۶-۳)$$

¹ Net present value

² Discount factor

³ Interest rate

۳-۴-۲-۳ شاخص سودآوری^۱

شاخص سودآوری به صورت زیر تعریف می شود:

$$Profitability\ index = \frac{NPV}{Z} \quad (۴۷-۳)$$

که Z هزینه سرمایه گذاری اولیه است. NPV بیانگر سودآوری یک پروژه در زمان حال است که شامل درآمدهای ناشی از فروش برق تولیدی، منهای هزینه های تعمیر و نگهداری می باشد. هرچه شاخص سودآوری بالاتر باشد، پروژه جذاب تر خواهد بود.

۳-۴-۲-۳ زمان بازگشت سرمایه^۲

زمان بازگشت سرمایه به صورت زیر تعریف می شود:

$$Payback\ Period = \frac{Z}{NAP} \quad (۴۸-۳)$$

که در رابطه بالا NAP^۳ سود خالص سالیانه از فروش برق می باشد.

۳-۴-۲-۳ هزینه کل

به منظور برآورد هزینه کلی پروژه می توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$Cost_{total} = Cost_{investment} + Cost_{fuel\ or\ energy\ consumption} + Cost_{O\&M} \quad (۴۹-۳)$$

که در رابطه بالا $Cost_{investment}$ هزینه سرمایه گذاری بر روی سیستم CHP، $Cost_{fuel\ or\ energy\ consumption}$ هزینه سوخت یا انرژی مصرفی که در این روزه صفر است و $Cost_{O\&M}$ هزینه تعمیر و نگهداری سیستم CHP می باشد.

¹ Profitability index

² Payback period

³ Net annual profit

فصل ۴: نتایج و بحث

۴-۱- مدل سازی

در این تحقیق به منظور ارزیابی تصفیه خانه فاضلاب از منظر اگزرژی چندین فرض ساده شونده برای راحت سازی محاسبات در نظر گرفته شده است که عبارت‌اند از [۳۲]:

- تمامی فرایندها در شرایط پایا هستند.
 - ترکیب بیوگاز بر اساس نسبت حجمی، ۶۵٪ متان و ۳۵٪ کربن دی‌اکسید می‌باشد.
 - از اتلاف حرارتی در تمامی واحدها و تجهیزات به غیر هاضم بی‌هوای صرف نظر شده است.
 - از تغییرات دبی فاضلاب در ساعات مختلف شبانه روز چشم پوشی شده است.
- برای تحلیل تصفیه خانه فاضلاب تهران تعدادی از پارامترها به عنوان اطلاعات ورودی انتخاب شده‌اند. داده‌های ورودی برای شبیه سازی در جدول (۴-۱) و (۴-۲) آورده شده است. لازم به ذکر است به دلیل وجود برخی از پارامترهای فاضلاب در همه نقاط تصفیه خانه، به منظور تکمیل داده‌های مورد نیاز، با توجه به نوع تصفیه خانه و بازدهی تجهیزات آن، برخی از پارامترهای مورد نیاز از طریق شبیه سازی انجام شده در مرجع [۳۲] تکمیل شده‌اند.

جدول (۴-۱) دبی فاضلاب در قسمت‌های مختلف تصفیه خانه فاضلاب تهران

نقاط	دبی ($\frac{m^3}{h}$)	نقاط	دبی ($\frac{m^3}{h}$)
1	14525	8	160
2	14525	9	360
3	14525	10	125
4	14363	12	125
5	14724	13	25
6	14525	14	100
7	200	15	235

جدول (۴-۲) COD فاضلاب در قسمت‌های مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب تهران

نقاط	COD(mg/l)	نقاط	COD(mg/l)
1	473.5	9	10961
2	464	10	29753
3	436	12	8378
4	309	13	29322
6	22	14	3142
7	10316	15	843
8	11757		

پارامترهای ورودی استفاده شده در شبیه‌سازی در جدول (۴-۳) ارائه شده است.

جدول (۴-۳) پارامترهای ورودی در شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
T_0 (K)	289.55	T_{21} (K)	317.15
P_0 (KPa)	100	P_{11} (KPa)	101
T_{digester} (K)	308.15	C_p (kJ/kg.K)	4.2
T_{11} (K)	308.15	SRT (day)	17.4

همچنین ضرایب کلی انتقال حرارت برای محاسبه بار گرمایی هاضم بی‌هوازی در جدول (۴-۴) نشان داده

شده است.

جدول (۴-۴) ضرایب کلی انتقال حرارت برای هاضم بی‌هوازی [۴۶]

U_{floor} ($\frac{kW}{m^2 K}$)	0.0014
U_{roof} ($\frac{kW}{m^2 K}$)	0.0016
U_{wall} ($\frac{kW}{m^2 K}$)	0.0008

به منظور محاسبه آگزرژی گازهای مخلوط می‌بایست مقدار آگزرژی شیمیایی هر جزء معلوم باشد. در جدول (۴-۵) مقادیر آگزرژی شیمیایی تعدادی از گازها آورده شده است.

جدول (۴-۵) آگزرژی شیمیایی عناصر

ماده	ظرفیت حرارتی ویژه (kJ/kg.K)	آگزرژی شیمیایی استاندارد (kJ/mol)
CH ₄	2.26	831.65
CO ₂	0.842	19.87
H ₂ S	1.003	812
O ₂	0.922	3.97
H ₂ O	1.996	9.5
N ₂	2.107	0.72
Na ₂ S	1.02	921.4
Na ₂ CO ₃	1.06	41.5
NaHCO ₃	1.04	21.6
NaOH	1.49	74.9
H ₂ O(l)	4.18	0.9
H ₂ O(g)	1.99	9.5

۴-۲- نتایج و بحث

به منظور اعتبار سنجی ارزیابی آگزرژی انجام گرفته در این تحقیق، چندین پارامتر مربوط به آگزرژی با یک مقاله دیگر مقایسه شده است. جدول (۴-۶) نشان می‌دهد که نتایج بدست آمده با داده‌های انتشار یافته در مقاله‌ای دیگر مطابقت دارد. در این شبیه‌سازی ۳ پارامتر به عنوان شاخص صحت سنجی در نظر گرفته شده‌اند که عبارتند از نرخ تخریب آگزرژی در هاضم بی‌هوایی، نرخ کل آگزرژی در بیوگاز تولید شده و همچنین نسبت تخریب آگزرژی در واحد هاضم بی‌هوایی.

جدول (۴-۶) مقایسه بین نتایج بدست آمده و منتشر شده در مقاله دیگر [۱۹]

Component	Parameter	Present work	References	Differences (%)
Digestion unit	Exergy destruction rate (kW)	768.3	765.0	0.42
Produced biogas	total exergy rate (kW)	4689.4	4684.8	0.01
Digestion unit	Exergy destruction ratio (%)	28.2	27.9	1.07

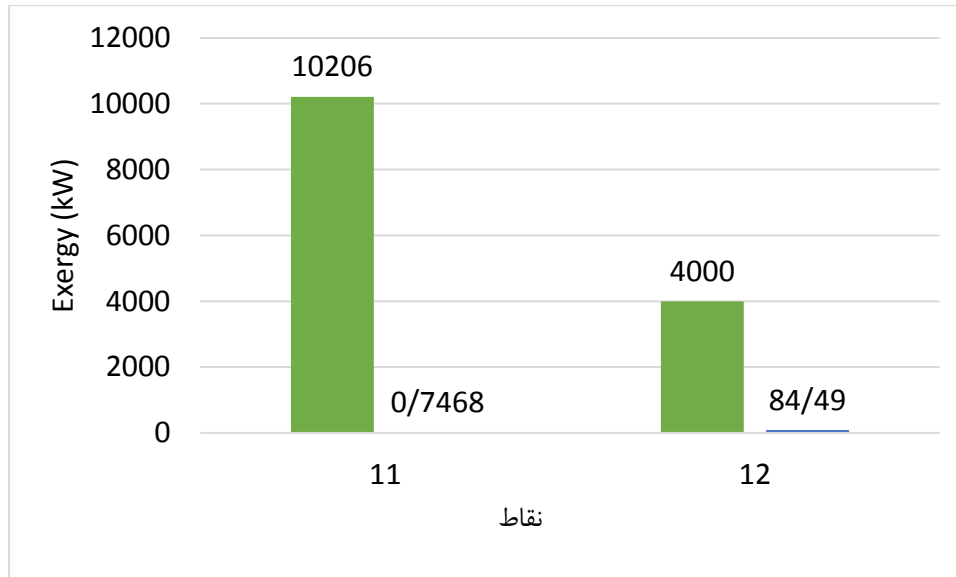
۴-۲-۱- تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران

جدول (۴-۶) نشان دهنده نوع جریان، دبی جرمی و مشخصات ترمودینامیکی جریان‌های موجود در تصفیه خانه فاضلاب می‌باشد. همان‌طور که در جدول ذیل نشان داده شده است با توجه به آنکه اگزرژی فیزیکی تابعی از دما می‌باشد و دمای فاضلاب و لجن تولید شده در تمامی قسمت‌های تصفیه خانه در تعادل با دمای محیط قرار دارد مقدار اگزرژی فیزیکی برای بیشتر نقاط صفر می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به این موضوع که اگزرژی شیمیایی فاضلاب در تمامی نقاط بالاست، اگزرژی فیزیکی در مقایسه با اگزرژی شیمیایی جریان‌های فاضلاب ناچیز است و قابل صرف نظر کردن می‌باشند.

جدول (۴-۷) نوع جریان، دبی جرمی و مشخصات ترمودینامیکی در تصفیه‌خانه فاضلاب تهران

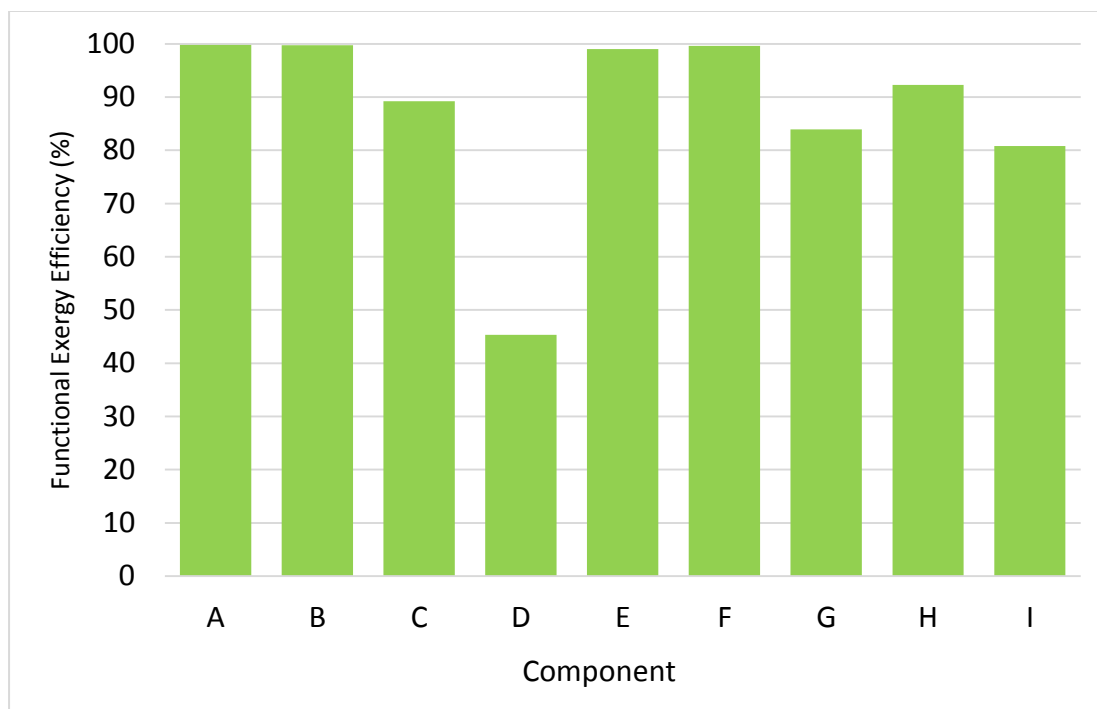
شماره	نوع جریان	فشار (kPa)	دما (K)	دبی جرمی (kg/s)	اگرژی شیمیایی (kW)	اگرژی فیزیکی (kW)
1	فاضلاب	100	289.55	4035	25982	-
2	فاضلاب	100	289.55	4035	25462	-
3	فاضلاب	100	289.55	4035	23935	-
4	فاضلاب	100	289.55	3990	16754	-
5	فاضلاب	100	289.55	4090	8981	-
6	پساب	100	289.55	4035	1207	-
7	لجن	100	289.55	55.41	7774	-
8	لجن	100	289.55	44.91	7180	-
9	لجن	100	289.55	100.3	14954	-
10	لجن	100	289.55	35.11	14206	-
11	بیوگاز	101	308.15	0.4285	8930	0.6534
12	لجن	100	308.15	35.11	5276	84.49
13	لجن	100	289.55	7.022	3693	-
14	لجن	110	289.55	28.09	1583	-
15	لجن	110	289.55	65.2	747.7	-
16	آب	150	308.15	11.52	-	28.19
17	آب	150	312.15	11.52	-	40.99
18	فاضلاب	100	289.55	4128	26265	-
19	فاضلاب	100	289.55	-	519.6	-
20	فاضلاب	100	289.55	-	1528	-
21	آب	150	317.15	13.82	-	72.24
22	آب	150	313.75	13.82	-	56.4

مقایسه مقادیر انرژی فیزیکی و شیمیایی برای بیوگاز و لجن خارج شده از هاضم بی‌هوازی در شکل (۴-۱) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به ماهیت لجن که دارای بار آلودگی و انرژی بالایی می‌باشد مقدار انرژی فیزیکی جریان‌های لجن در مقایسه با انرژی آن‌ها قابل نظر کردن می‌باشد.



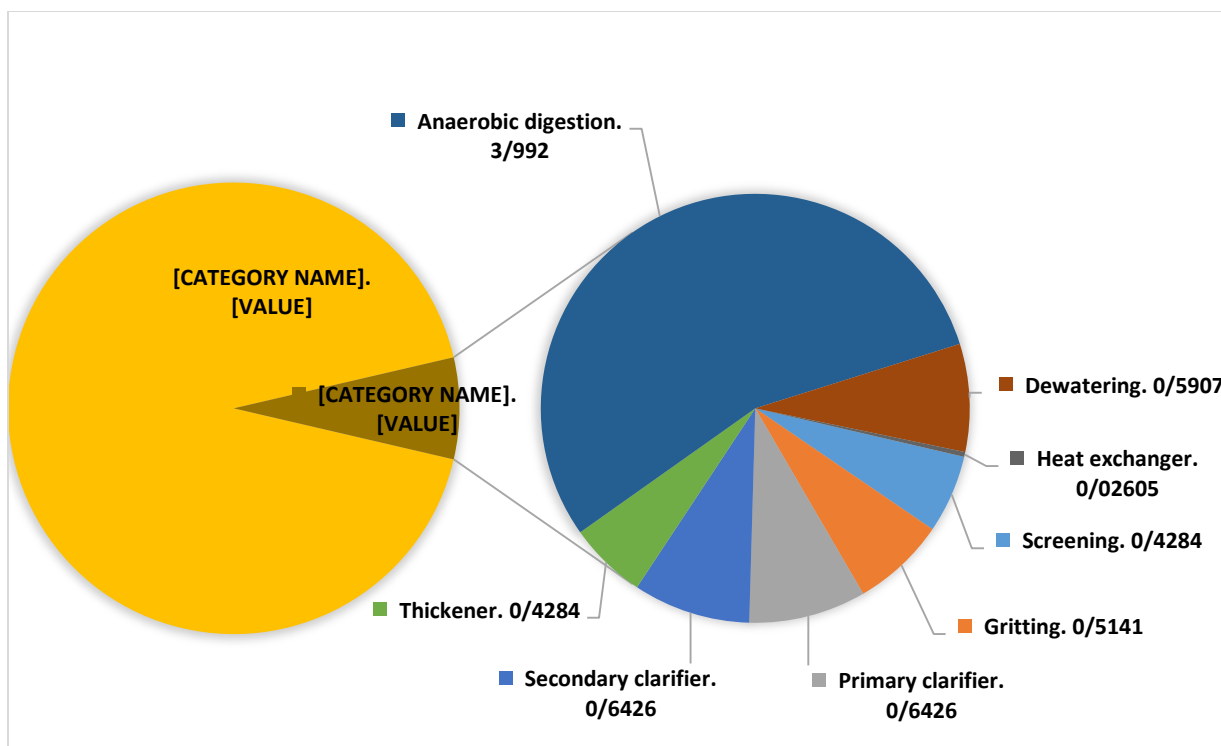
شکل (۴-۱) مقایسه مقادیر انرژی فیزیکی و شیمیایی

در شکل (۴-۲) بازده انرژی تابعی واحدهای تصفیه‌خانه فاضلاب و مبدل حرارتی نمایش داده شده است. با توجه به ماهیت واحدهای آشغال‌گیری و دانه‌گیری که بر اساس مکانیزم‌های فیزیکی کار می‌کنند، مقدار بازدهی انرژی در این واحدها بالا می‌باشد. کمترین مقدار بازده انرژی مربوط به راکتور هوادهی (D) می‌باشد که مربوط به عملکرد ذاتی فرایند مورد استفاده در آن است. با توجه به اینکه اساس کار در این واحد بر اساس فعالیت باکتری‌های هوازی می‌باشد، این باکتری‌ها با استفاده از مواد مغذی موجود در فاضلاب (که همین مواد آلودگی فاضلاب را شکل می‌دهد) و مصرف اکسیژن وارد شده به این راکتور رشد و نمو کرده و در نتیجه فعالیت زیستی آن‌ها مقادیر زیادی گاز از جمله کربن دی‌اکسید و متان تولید شده و وارد اتمسفر می‌شوند. به همین علت بدون اینکه بتوان از انرژی موجود در فاضلاب استفاده کرد، این حجم از انرژی بدون استفاده وارد فضا می‌گردد و همین امر منجر به پایین بودن بازده انرژی در این واحد می‌باشد.



شکل (۴-۲) بازده انرژی تابعی واحدهای تصفیه‌خانه فاضلاب و مبدل حرارتی

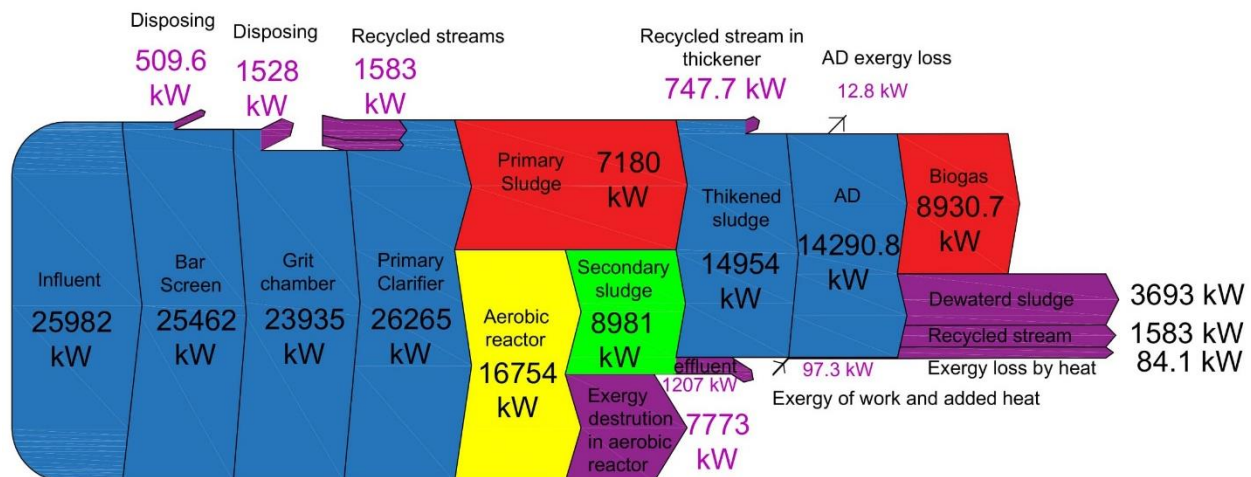
در شکل (۴-۳) نسبت تخریب انرژی هر واحد به تخریب انرژی کل بر حسب درصد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین تخریب انرژی مربوط به واحد هوادهی (D) بوده و بعد از آن هاضم بی‌هوایی (G) قرار دارد. تخریب انرژی در هاضم بی‌هوایی به علت بالاتر بودن دمای آن با محیط رخ می‌دهد که مقدار آن در مقایسه با واحد هوادهی بسیار کمتر است. تخریب انرژی در واحد هوادهی به علت فرار گازهای تولید شده توسط باکتری‌های به اتمسفر رخ می‌دهد. به عبارتی نوع انرژی تخریب شده در هاضم بی‌هوایی و راکتور هوادهی با یکدیگر متمایز است. با توجه به اینکه تخریب انرژی در هاضم بی‌هوایی به علت تفاوت دماست، انرژی فیزیکی در آن تخریب می‌شود اما در راکتور هوادهی با توجه به اینکه ترکیب شیمیایی فاضلاب به علت فعالیت باکتری‌ها دستخوش تغییر می‌شود انرژی شیمیایی در آن تخریب می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود تخریب انرژی در مابقی واحدها در مقایسه با دو واحد گفته‌شده ناچیز است.



شکل (۳-۴) نسبت تخریب اگزرژی هر واحد به تخریب اگزرژی کل (%)

شکل (۴-۴) دیاگرام گراسمن در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه به علت داشتن آلودگی‌های زیاد دارای اگزرژی بالایی می‌باشد، اما به علت آنکه فاضلاب خام ورودی دارای مقدار زیادی آب می‌باشد امکان بهره‌برداری و استفاده از آن امکان‌پذیر نیست. به‌منظور بازیافت این اگزرژی و در دسترس کردن آن، فرایندهای مختلفی بر روی فاضلاب انجام می‌گیرد. درواقع هدف اصلی از تصفیه فاضلاب کاهش آلودگی فاضلاب می‌باشد، به‌نحوی که آبی که جز تشکیل‌دهنده اصلی فاضلاب است، بار آلودگی کمی داشته باشد و بار اصلی آلودگی به‌صورت مواد قابل ته‌نشین از فاضلاب جدا گردد. این جداسازی‌های پیوسته در فرایندهای مختلف تصفیه‌خانه، منجر به جمع‌آوری این آلودگی‌ها از فاضلاب شده و به منبع بزرگی برای بازیافت انرژی تبدیل می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴-۴) نشان داده شده فاضلاب خام ورودی دارای ۲۵۹۸۲ کیلووات اگزرژی می‌باشد. با گذر فاضلاب از فرایند آشغال و دانه‌گیری به ترتیب در هر مرحله ۵۰۹/۶ و ۱۲۵۸ کیلووات اگزرژی از تصفیه‌خانه خارج می‌شود، به‌نحوی که دیگر قابل استفاده نیست. مابقی اگزرژی وارد تانک ته‌نشینی اولیه شده و در این واحد، دو جریان اگزرژی برگشتی از واحدهای تغلیظ و آبگیری به جریان اگزرژی اصلی اضافه می‌گردد. در حدود ۷۱۸۰ کیلووات اگزرژی

در تانک ته‌نشینی به‌صورت لجن اولیه از فاضلاب جدا می‌گردد و مابقی آن که در حدود ۱۶۷۵۴ کیلووات است وارد واحد لجن فعال می‌شود. در این واحد به علت فعالیت باکتری‌ها در حدود ۷۷۷۳ کیلووات انرژی به گازهای متان و کربن دی‌اکسید تبدیل شده و وارد هوا می‌گردد. به علت عدم امکان جمع‌آوری این گازها (چون در هوا پراکنده‌اند) این مقدار انرژی تماماً تخریب می‌شود. مابقی انرژی که در حدود ۸۹۸۱ کیلووات است وارد تانک ته‌نشینی ثانویه شده و بخش‌های جامد آن در این قسمت ته‌نشین می‌گردد. پساب تشکیل شده در تانک ته‌نشینی ثانویه در حدود ۱۲۰۷ کیلووات انرژی داشته که از جریان تصفیه‌خانه خارج می‌گردد. لجن مازاد یا ثانویه که در تانک ته‌نشینی ثانویه تشکیل شده ۸۹۹۱ کیلووات انرژی داشته که با لجن اولیه مخلوط می‌شود و سپس وارد واحد تغلیظ لجن می‌گردد. بخش کوچکی از انرژی لجن‌ها در واحد تغلیظ، به‌عنوان جریان برگشتی به تانک ته‌نشینی اولیه برگردانده می‌شود. سپس لجن تغلیظ شده وارد هاضم بی‌هوازی شده و در آن مقداری انرژی ناشی از گرما و کار به آن افزوده می‌گردد. به علت دمای بالاتر هاضم نسبت به محیط، مقداری انرژی ناشی از گرمای هدر رفت، تخریب می‌گردد. سپس بخش زیادی از این انرژی وارد شده به هاضم، به‌صورت گاز متان در آمده و از هاضم خارج می‌شود. مابقی انرژی باقی‌مانده، به‌صورت لجن هضم شده از هاضم خارج شده و به واحد آبگیری هدایت می‌شود. به علت آنکه دمای لجن خارج شده از هاضم بالاتر از محیط است، مقداری از این انرژی به علت اتلاف حرارتی تخریب می‌گردد. همچنین قسمتی از این انرژی به‌صورت جریان برگشتی وارد تانک اولیه می‌شود و مابقی آن به‌صورت لجن آبگیری شده از تصفیه‌خانه فاضلاب خارج می‌گردد.



شکل (۴-۴) دیاگرام گراسمن جریان تصفيه‌خانه فاضلاب جنوب تهران

۴-۲-۲- دیگر تصفيه‌خانه‌های فاضلاب در تهران

حال که تغییرات اگزرژی در فرایندهای مختلف تصفيه‌خانه فاضلاب جنوب تهران بررسی شد، می‌توان به بررسی سایر تصفيه‌خانه‌های فاضلاب از منظر اگزرژی پرداخت. توجه به جمعیت زیاد و شیب افزایشی آن در شهر تهران، تصفيه‌خانه‌های فاضلاب متعددی در مناطق مختلف آن احداث شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. در این تصفيه‌خانه‌ها با توجه به تراکم جمعیت و همچنین شرایط مختلف جغرافیایی از فرایندهای مختلفی برای تصفيه فاضلاب شهری تولیدی استفاده شده است. همچنین با توجه به متفاوت بودن سبک زندگی افراد ساکن در هر منطقه، میزان فاضلاب تولیدی توسط هر فرد و همچنین بار آلودگی آن متفاوت می‌باشد. به علت آنکه عموماً پارامترهای فاضلاب و لجن در قسمت‌های مختلف تصفيه‌خانه‌های فاضلاب به‌طور دائم بررسی نمی‌شوند و در صورتی هم که بشوند عموماً پراکنده و ناقص می‌باشند، اطلاعات مستند زیادی در مورد پارامترهای فاضلاب در تصفيه‌خانه‌های مختلف کشور که بتوان از آن‌ها برای ارزیابی آن‌ها از منظر انرژی و اگزرژی استفاده کرد وجود ندارد. همچنین با توجه به تغییرات فاضلاب تولیدی به علت تغییر در نوع زندگی افراد در ماه‌های مختلف سال، پارامترهای نقطه‌ای برای تحلیل تصفيه‌خانه‌ها قابل اتکا نمی‌باشند. در جدول (۴-۷) اطلاعات به‌دست‌آمده در ارتباط با ۶ تصفيه‌خانه فاضلاب شهری در تهران (به غیر از تصفيه‌خانه فاضلاب جنوب تهران) نشان داده شده است.

جدول (۴-۸) مشخصات ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب شهری در شهر تهران [۴۷]

Number of WWTP	1		2		3		4		5		6	
Biological treatment	AS/EA ¹		AS/EA		AS/EA		AS/EA		CAS ²		A ² O AS ³	
People served	7000		42000		30000		20000		85000		100000	
Mean influent flow (m3/h)	50		200		200		100		1200		670	
Mean influent COD (mg/L)	264	152	160	304	140	120	170	312	192	216	400	200
Mean effluent COD (mg/L)	12.8	16	9.6	16	16	12.8	6.4	12.8	12.8	16	41.6	12.8
Mean influent BOD (mg/L)	200	130	90	130	90	90	155	285	160	185	155	125
Mean effluent BOD (mg/L)	8	14	8	8	3.5	8	2.4	4.5	5.8	8	10	7.1
Mean influent TSS (mg/L)	180	160	100	230	50	315	120	515	145	325	250	225
Mean effluent TSS (mg/L)	22	20	10	26	15	10	1	5	17.5	30	11	17

۴-۲-۱- اگزرژی ورودی و خروجی از تصفیه‌خانه‌ها

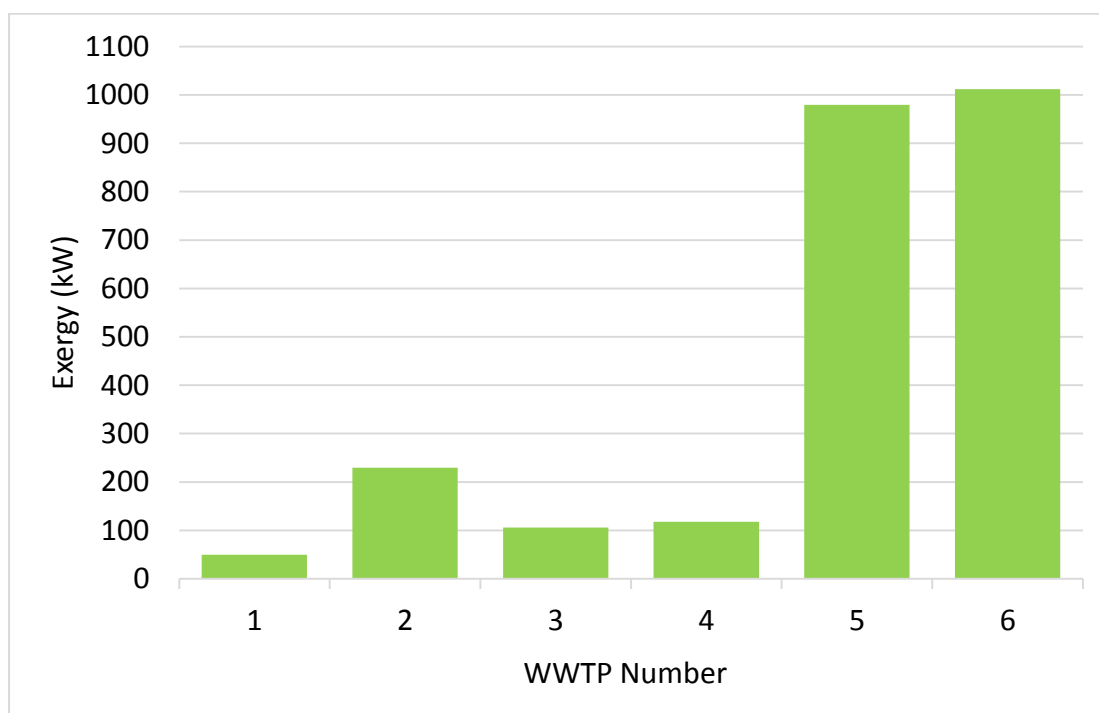
لازم به ذکر است نمونه برداری‌های انجام شده از فاضلاب و پساب در زمان‌های مختلفی به انجام رسیده و همان‌طور که مشخص است بار آلودگی فاضلاب در زمان‌های مختلف دچار تغییرات زیادی می‌گردد. با توجه به اینکه لجن تولید شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یکی از منابع بزرگ انرژی‌های تجدید پذیر به حساب می‌آیند لازم است به منظور امکان‌سنجی در خصوص استفاده از این منابع تجدید پذیر، کمیت و کیفیت این منابع مورد ارزیابی قرار بگیرند. به همین دلیل در ادامه به بررسی اگزرژی جریان‌های فاضلاب در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مذکور پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه برای هر تصفیه‌خانه مورد مطالعه ۲ بار آلودگی متفاوت در دسترس است، محاسبات برای هر دو مقدار به انجام رسیده است. در شکل‌های (۴-۵) تا (۴-۷) به ترتیب بیشترین، کمترین و میانگین اگزرژی موجود در فاضلاب ورودی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است، تصفیه‌خانه‌های شماره ۵ و ۶ به علت آنکه جمعیت بیشتری را پوشش می‌دهند بار آلودگی در آن‌های بسیار بیشتر از تصفیه‌خانه‌های شماره ۱ تا ۴ است به نحوی که اگزرژی هر یک از

¹ Activated sludge/extended aeration

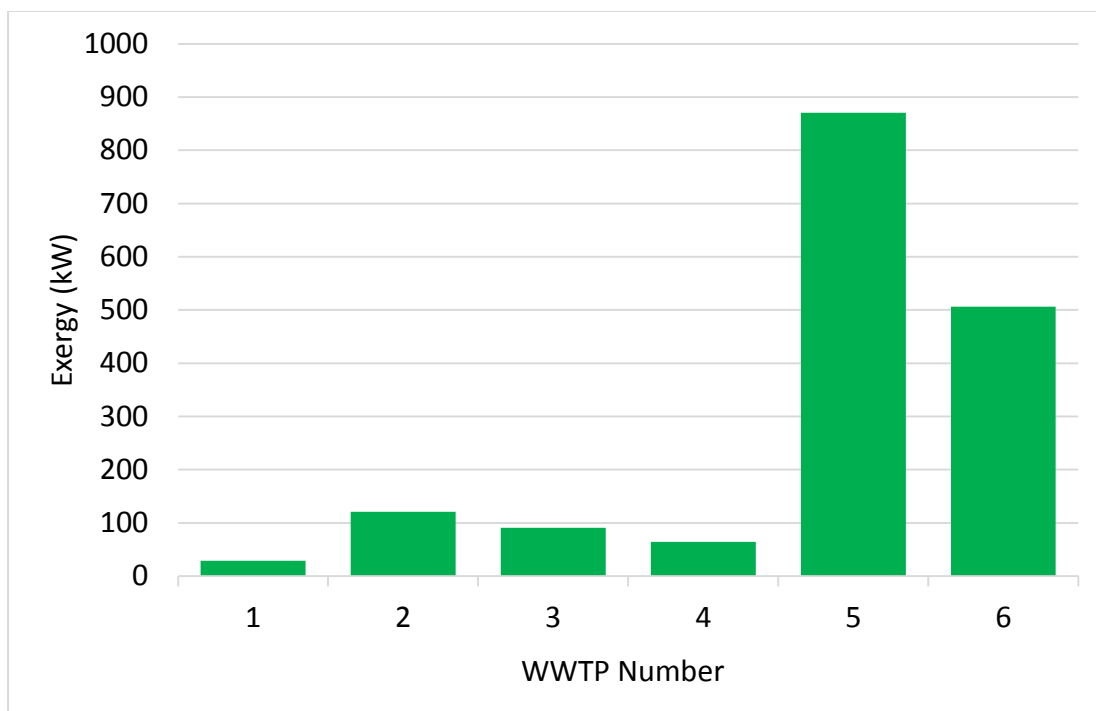
2 Conventional activated sludge

³ The A2O process is composed of an anaerobic/anoxic/oxic process which removes biological phosphorus with simultaneous nitrification-denitrification

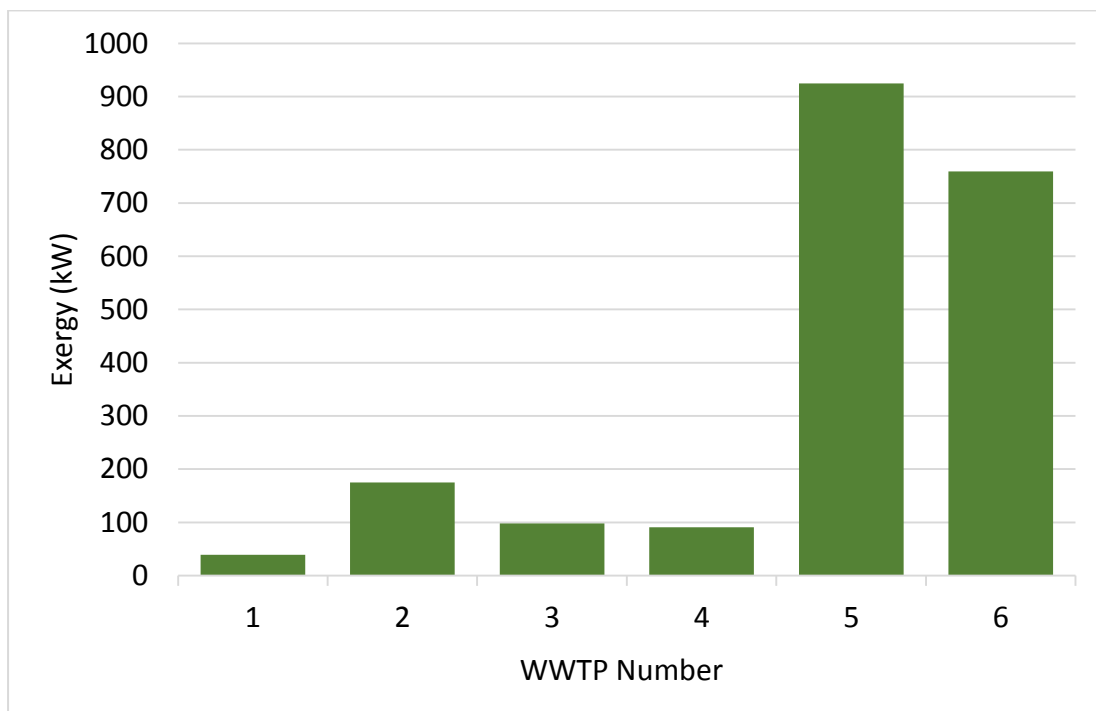
این تصفیه‌خانه‌ها به‌تنهایی از آگزرژی مجموع چهار تصفیه‌خانه دیگر نیز بیشتر است. اما همان‌طور که در شکل (۶-۴) نشان داده شده است، میزان آگزرژی موجود در فاضلاب تصفیه‌خانه شماره ۶ با تغییر بار آلودگی فاضلاب به‌شدت کاهش پیدا کرده است و در حدود نصف مقدار خود در حالت قبل شده است. بااینکه در شکل (۵-۴) مقدار آگزرژی فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه شماره ۶ از تصفیه‌خانه شماره ۵ بیشتر است اما در شکل (۶-۴) مقدار آن در حدود ۴۰٪ از تصفیه‌خانه شماره ۵ کمتر شده است. بنابراین با توجه به تغییرات فاضلاب ورودی، به‌منظور دستیابی به نتایج قابل‌اتکاتر، بهتر است از میانگین آگزرژی فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه‌ها که در شکل (۷-۴) نمایش داده شده است استفاده گردد.



شکل (۵-۴) بیشترین آگزرژی موجود در فاضلاب ورودی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

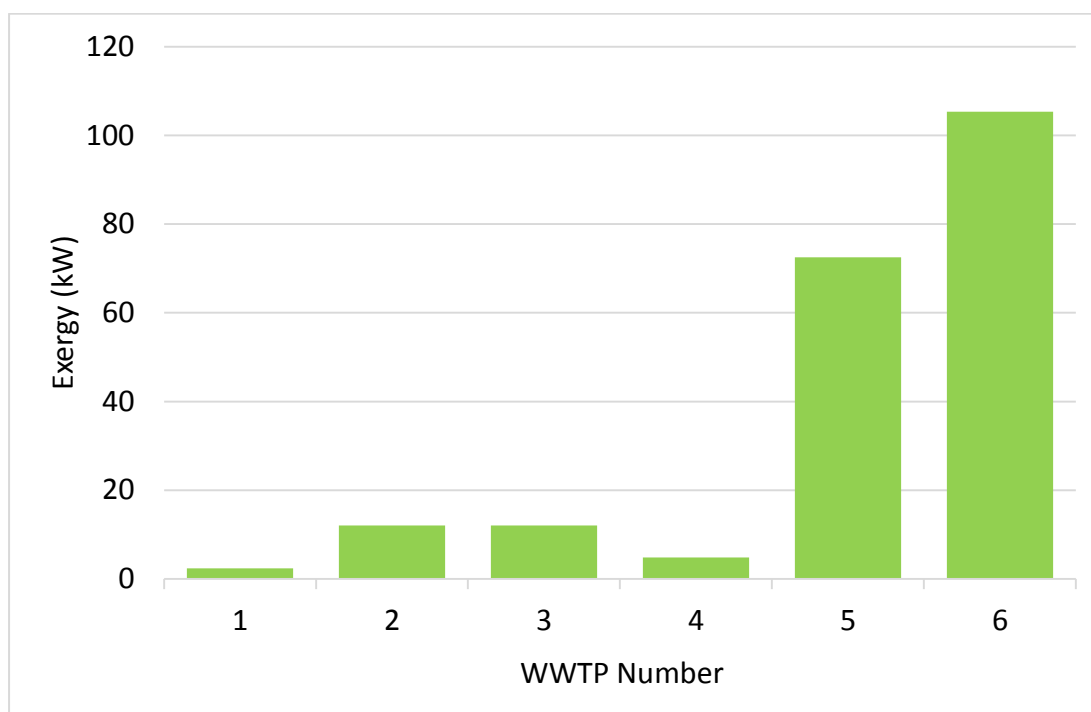


شکل (۴-۶) کمترین انرژی موجود در فاضلاب ورودی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

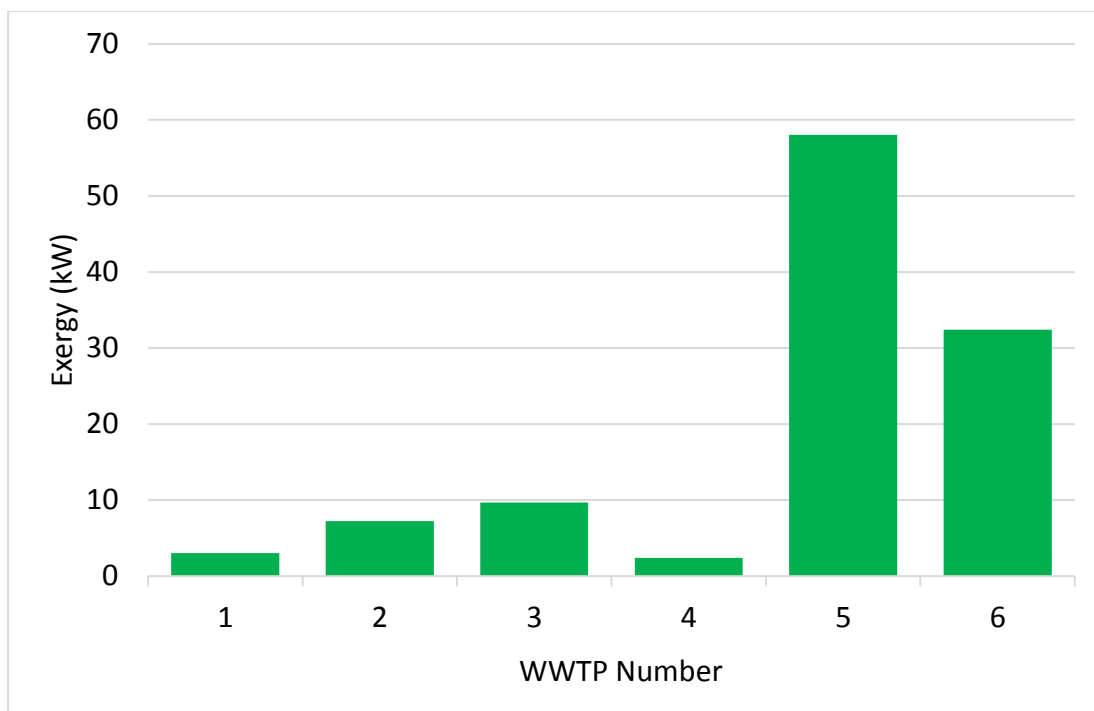


شکل (۴-۷) میانگین انرژی موجود در فاضلاب ورودی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

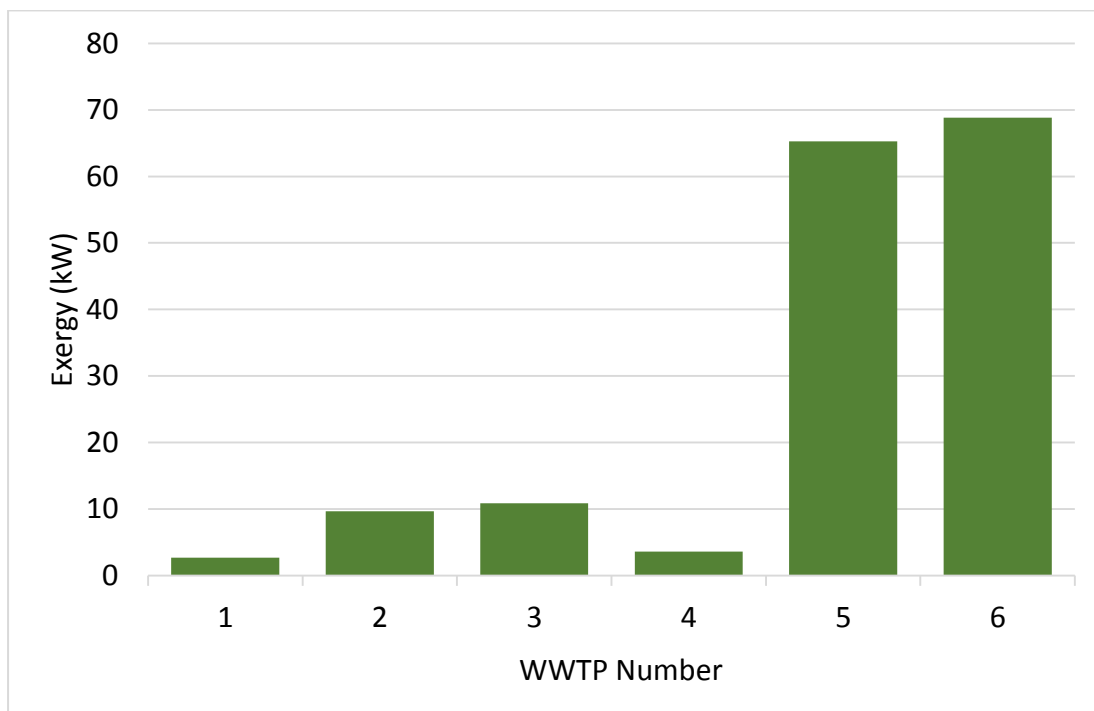
در شکل‌های (۸-۴) تا (۱۰-۴) به ترتیب انرژی موجود در فاضلاب خروجی (پساب) تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متناظر با بیشترین، کمترین و میانگین انرژی موجود در فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۸-۴) نشان داده است میزان انرژی موجود در پساب تصفیه‌خانه‌های شماره ۵ و ۶ بسیار بیشتر از چهار تصفیه‌خانه دیگر است. با اینکه مقدار COD پساب تصفیه‌خانه‌ها که در جدول (۷-۴) آمده است در اکثر موارد اختلاف چندانی با هم ندارند اما به علت دبی زیاد تصفیه‌خانه‌های شماره ۵ و ۶ مقدار انرژی آن‌ها زیاد خواهد بود به نحوی که حتی مقدار آن‌ها از مقدار انرژی ورودی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شماره ۱ تا ۴ که در شکل (۷-۴) نشان داده شده است، بیشتر است. همان‌طور که در شکل (۸-۴) نشان داده شده است میزان انرژی پساب تصفیه‌خانه شماره ۶ از تصفیه‌خانه شماره ۵ بیشتر است اما با توجه به شکل (۹-۴) مقدار انرژی پساب تصفیه‌خانه شماره ۶ بسیار کاهش یافته، به نحوی که مقدار انرژی آن در حدود ۴۵٪ از انرژی پساب تصفیه‌خانه شماره ۵ کمتر شده است. به‌مانند توضیحاتی که پیش‌تر برای دستیابی به نتایج قابل‌اتکاتر داده شد، بهتر است از میانگین انرژی پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها که در شکل (۱۰-۴) نمایش داده شده است استفاده گردد.



شکل (۸-۴) انرژی موجود در پساب خروجی تصفیه‌خانه‌ها متناظر با بیشترین انرژی موجود در فاضلاب ورودی

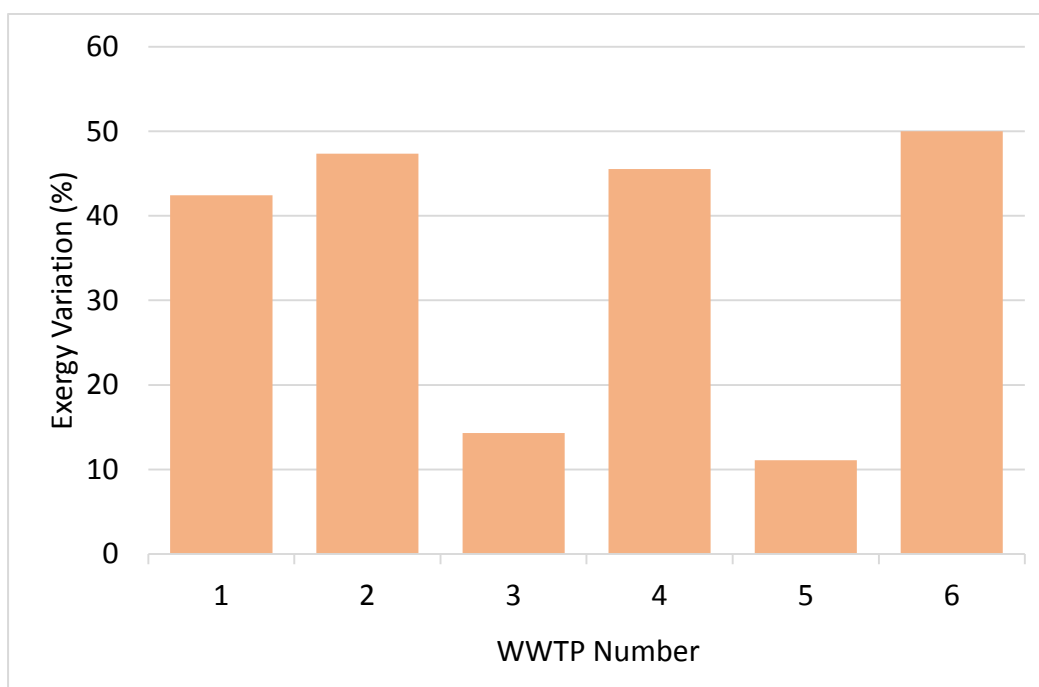


شکل (۴-۹) اگزرژی موجود در پساب خروجی تصفیه‌خانه‌ها متناظر با کمترین اگزرژی موجود در فاضلاب ورودی



شکل (۴-۱۰) میانگین اگزرژی موجود در پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

در شکل (۴-۱۱) تغییرات انرژی فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شماره ۱ تا ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انرژی فاضلاب به علت تغییر در بار آلودگی آن در همه تصفیه‌خانه‌ها دستخوش تغییر شده است، به‌گونه‌ای که در این میان، تصفیه‌خانه‌های شماره ۳ و ۵ دارای کمترین تغییر در بار آلودگی و به طبع انرژی هستند و مقدار تغییرات در حدود ۱۰٪ می‌باشد. تغییرات انرژی در مابقی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نزدیک به هم بوده و همگی بیش از ۴۰٪ می‌باشد.

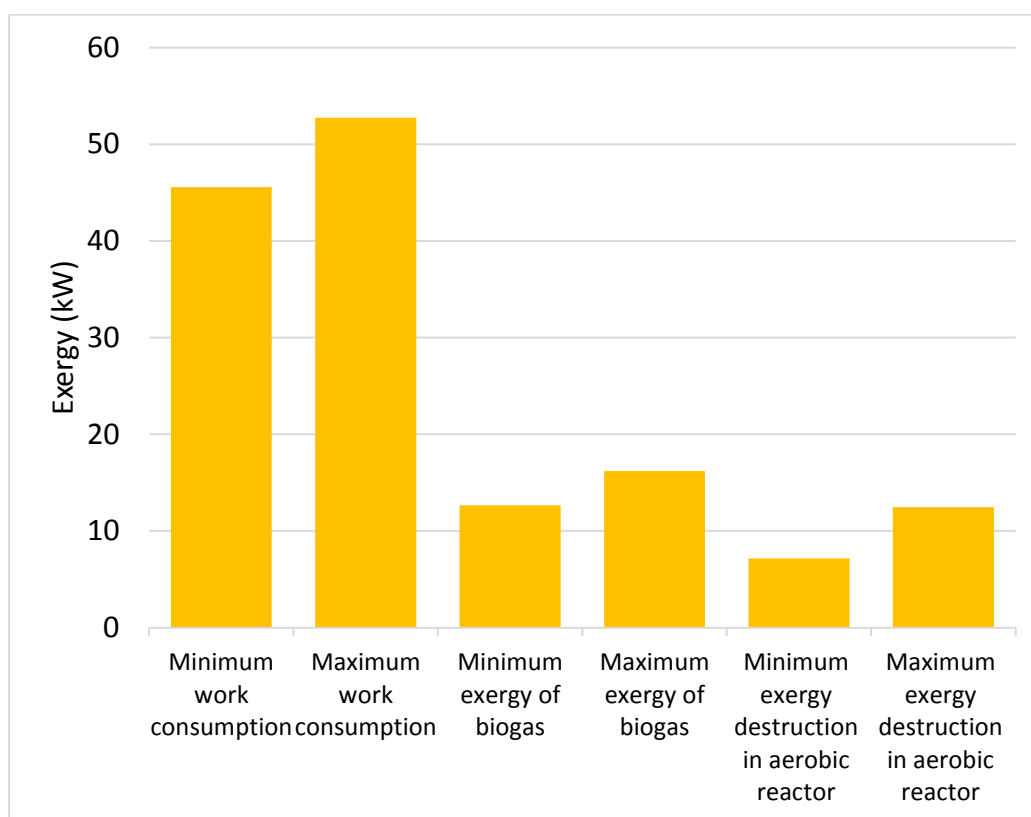


شکل (۴-۱۱) تغییرات انرژی فاضلاب ورودی

شکل (۴-۱۲) تغییرات انرژی پساب متناسب با تغییرات انرژی فاضلاب ورودی را نشان می‌دهد. از آنجا که راهبری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب همواره به‌طور ثابتی انجام می‌گیرد، هر چه میزان بار آلودگی فاضلاب ورودی که انرژی از آن ناشی می‌شود بیشتر باشد، پساب خروجی از تصفیه‌خانه بار آلودگی و به طبع انرژی بیشتری خواهد داشت که این موضوع برای تصفیه‌خانه‌های شماره ۲ تا ۶ مشخص است. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش بار آلودگی فاضلاب ورودی در تصفیه‌خانه شماره ۱ که در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است، بار آلودگی پساب خروجی از همین تصفیه‌خانه که در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است، برخلاف تصفیه‌خانه‌های دیگر کاهش یافته است. این نتیجه در دو حالت قابل توجیه می‌باشد. نخست آنکه پارامتر آزمایش شده COD دارای خطا بوده است که این مورد با توجه به اینکه هر مقدار COD اعلام شده، میانگین سه

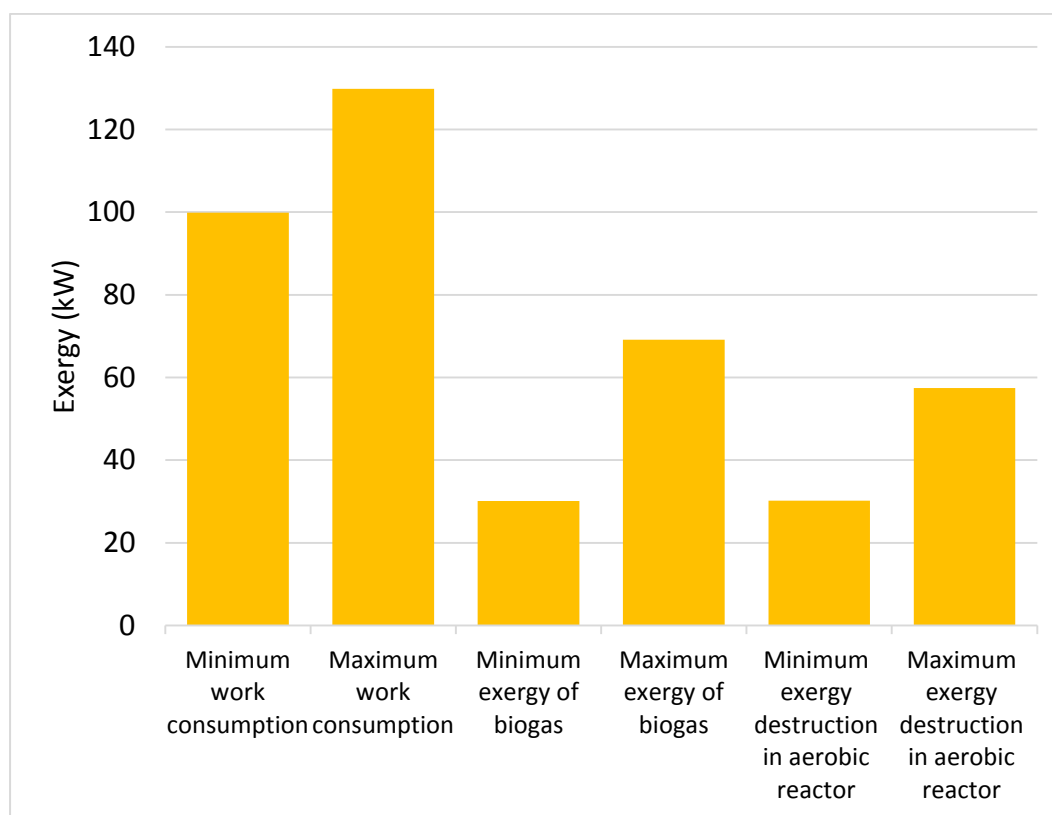
گرفته شده است. همان‌طور که در مطالعه اگزرژی تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران مشاهده شد، بیشترین تخریب اگزرژی در راکتور هوادهی رخ می‌دهد. برای ارزیابی تخریب اگزرژی در تصفیه‌خانه‌های مذکور، میزان تخریب اگزرژی در راکتور هوادهی در حدود ۲۵٪ از اگزرژی ورودی فاضلاب در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که منظور از بیشترین و کمترین اگزرژی در راکتور هوادهی و همچنین تولید بیوگاز متناظر با تغییرات مربوط به فاضلاب ورودی به هر تصفیه‌خانه می‌باشد.

شکل (۴-۱۳) تحلیل اگزرژی در تصفیه‌خانه شماره ۱ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان اگزرژی ناشی از کار مصرفی در این تصفیه‌خانه، ۴ الی ۵ برابر اگزرژی موجود در بیوگاز قابل استحصال در این تصفیه‌خانه است. همچنین میزان تخریب اگزرژی در واحد هوادهی همواره کمتر از اگزرژی بیوگاز می‌باشد.



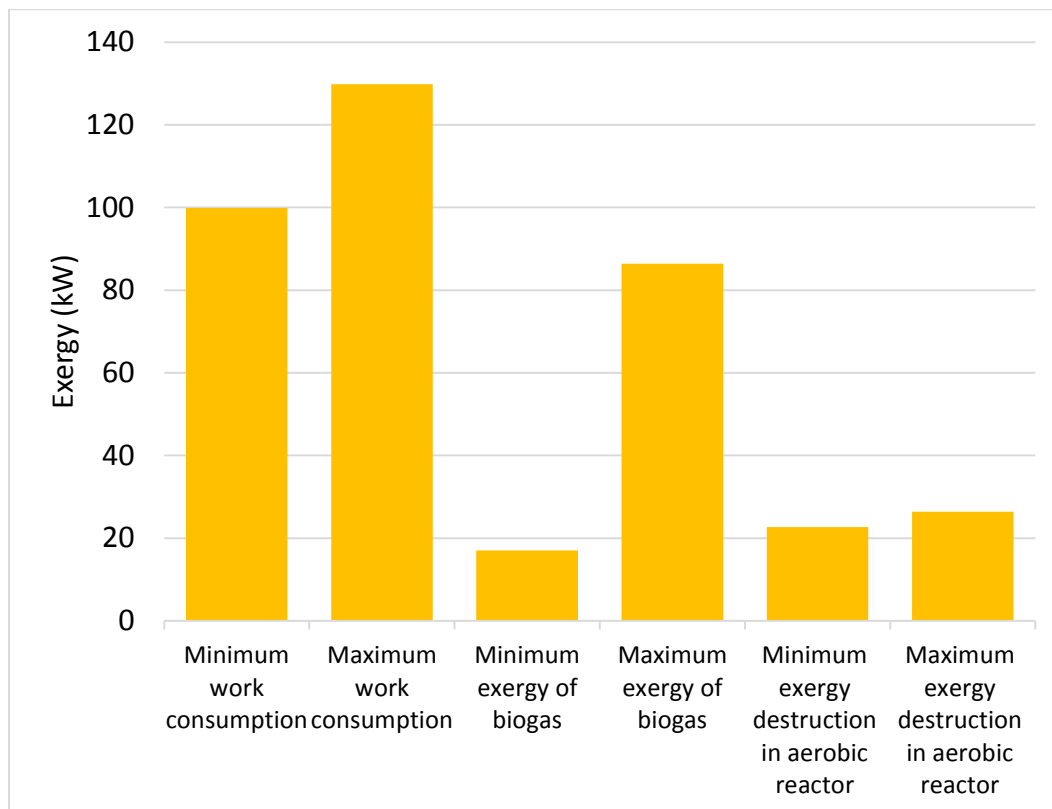
شکل (۴-۱۳) تحلیل اگزرژی برای تصفیه‌خانه شماره یک

شکل (۴-۱۴) تحلیل انرژی در تصفیه‌خانه شماره ۲ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مذکور مشخص است میزان انرژی ناشی از کار مصرفی برای تصفیه‌خانه در حالت کمینه در حدود ۳ برابر انرژی بیوگاز و همچنین انرژی تخریب شده در واحد هوادهی در حالت کمینه می‌باشد. در حالت بیشینه، مقدار انرژی ناشی از کار مصرفی در حدود ۲ برابر انرژی بیوگاز و ۲/۳ انرژی تخریب شده در واحد هوادهی است.



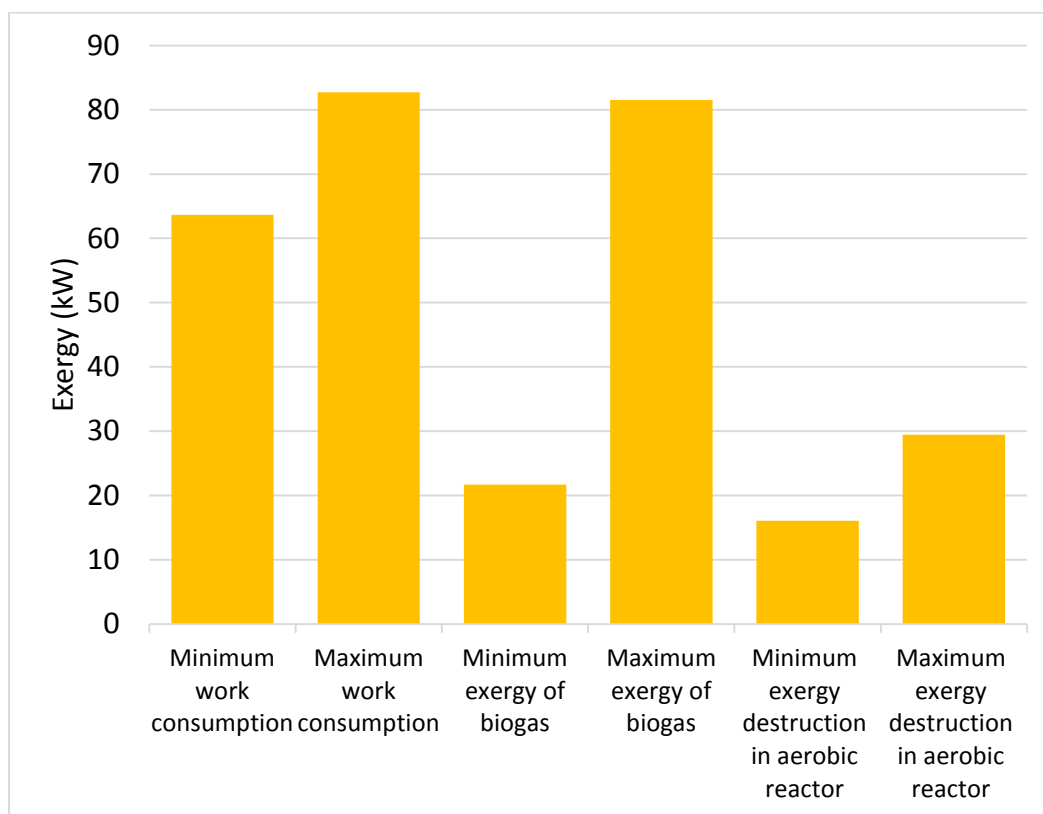
شکل (۴-۱۴) تحلیل انرژی برای تصفیه‌خانه شماره دو

شکل (۴-۱۵) تحلیل انرژی در تصفیه‌خانه شماره ۳ را نشان می‌دهد. در حالت کمینه و بیشینه به ترتیب، میزان انرژی ناشی از کار مصرفی بیش از ۵ و ۱/۵ برابر انرژی بیوگاز می‌باشد. دلیل این تغییر عمده به کیفیت فاضلاب تولید شده (پارامترهای مؤثر در تولید بیوگاز) در دو حالت برمی‌گردد. همچنین در حالت بیشینه، مقدار انرژی ناشی از بیوگاز در حدود ۴ برابر انرژی تخریب شده در واحد هوادهی است.



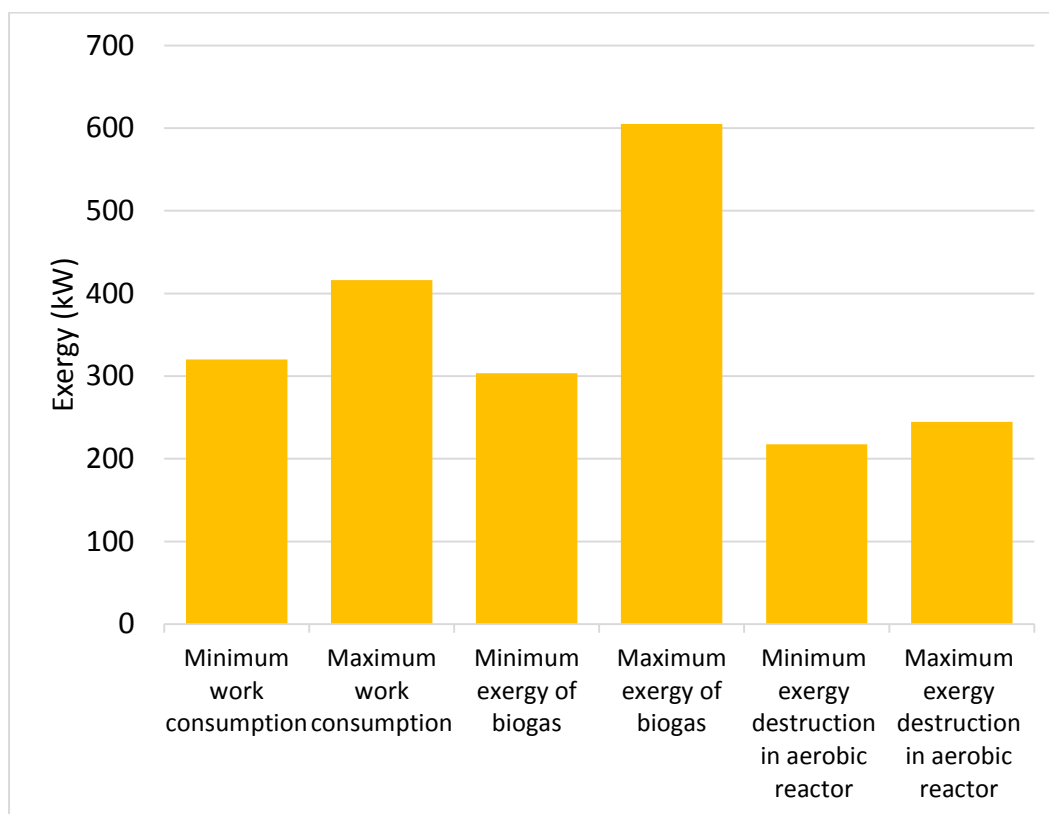
شکل (۴-۱۵) تحلیل انرژی برای تصفیه‌خانه شماره سه

شکل (۴-۱۶) تحلیل انرژی در تصفیه‌خانه شماره ۴ را نشان می‌دهد. در حالت کمینه، مقدار انرژی ناشی از کار مصرفی در این تصفیه‌خانه، در حدود ۳ برابر انرژی بیوگاز و انرژی تخریب شده در واحد هوادهی می‌باشد. اما در حالت بیشینه، مقدار انرژی بیوگاز قابل استحصال تقریباً برابر با انرژی کار مصرفی و ۲/۵ برابر انرژی تخریب شده می‌باشد.



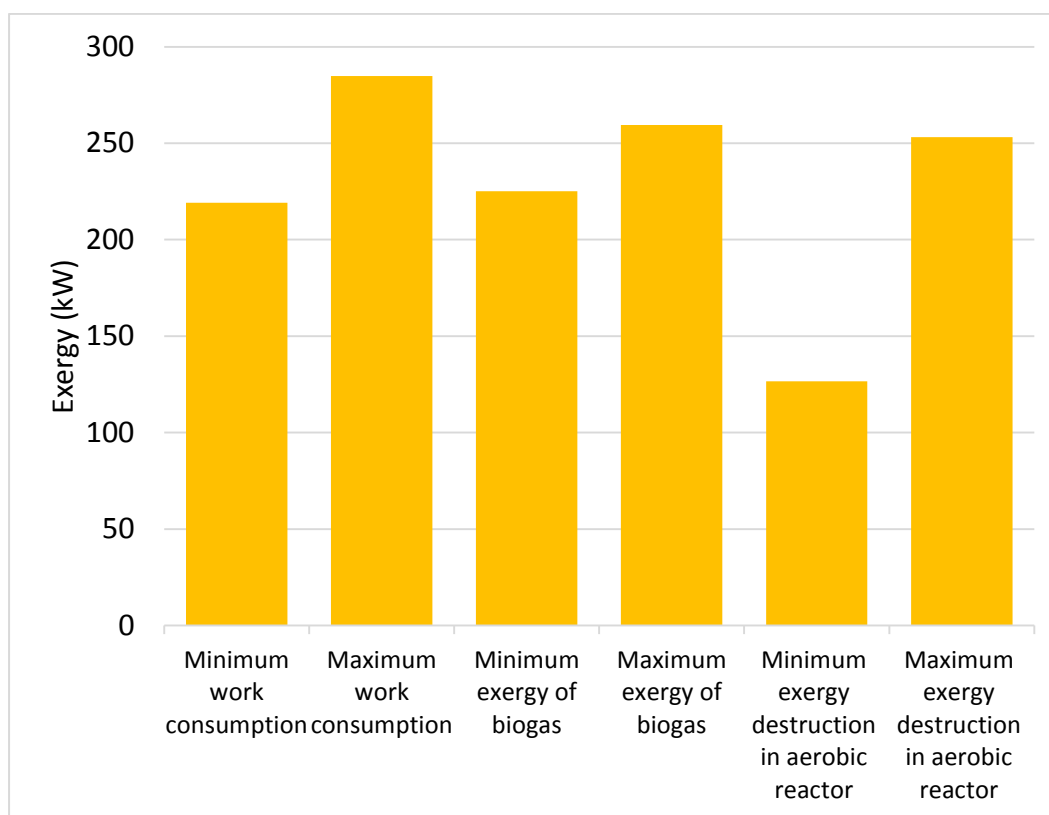
شکل (۴-۱۶) تحلیل انرژی برای تصفیه‌خانه شماره چهار

شکل (۴-۱۷) تحلیل انرژی در تصفیه‌خانه شماره ۵ را نشان می‌دهد. در این تصفیه‌خانه در حالت کمینه، انرژی کار مصرفی تقریباً برابر با انرژی بیوگاز و کمی بیشتر از انرژی تخریب شده در راکتور هوا دهی می‌باشد. در حالت بیشینه، انرژی بیوگاز در حدود ۱/۵ برابر انرژی کار مصرفی و در حدود ۳ برابر انرژی تخریب شده در راکتور هوا دهی است.



شکل (۴-۱۷) تحلیل انرژی برای تصفیه‌خانه شماره پنج

شکل (۴-۱۸) تحلیل انرژی در تصفیه‌خانه شماره ۶ را نشان می‌دهد. در این تصفیه‌خانه در حالت کمینه، انرژی بیوگاز حدوداً ۲ برابر انرژی تخریب شده در واحد هوادهی و تقریباً برابر با انرژی کار مصرفی می‌باشد. در حالت بیشینه، مقدار انرژی کار مصرفی کمی از انرژی بیوگاز بیشتر می‌شود. در این حالت انرژی بیوگاز و انرژی تخریب شده در راکتور هوادهی تقریباً با هم برابرند.



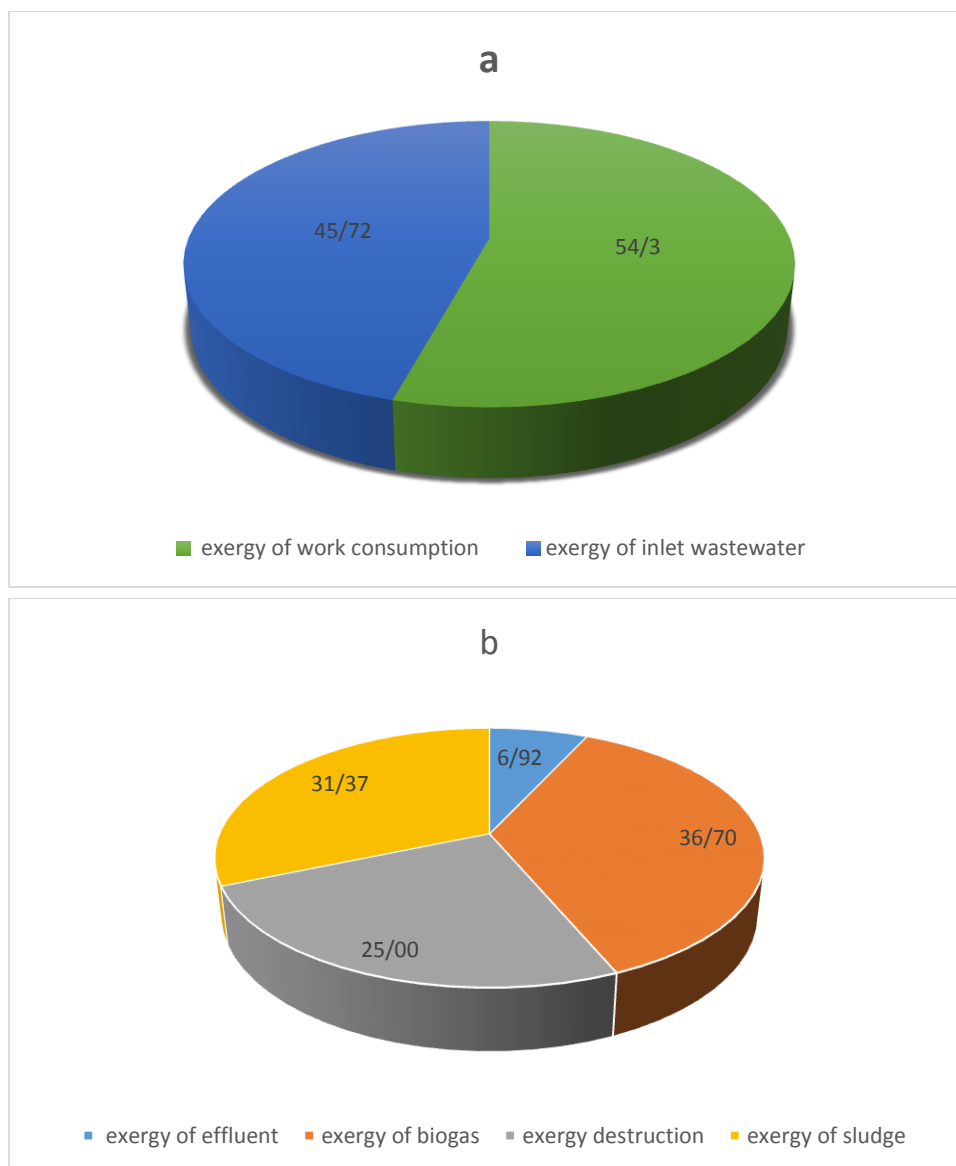
شکل (۴-۱۸) تحلیل انرژی برای تصفیه‌خانه شماره شش

در تحلیل انرژی تصفیه‌خانه، مناسب‌تر آن است که از مقادیر میانگین برای تحلیل موازنه انرژی در واحدهای اصلی تصفیه‌خانه استفاده شود که در جدول (۴-۸) مقادیر میانگین انرژی کار مصرفی، فاضلاب ورودی، پساب و لجن خروجی، بیوگاز و انرژی تخریبی آورده شده است.

جدول (۴-۹) انرژی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مورد مطالعه

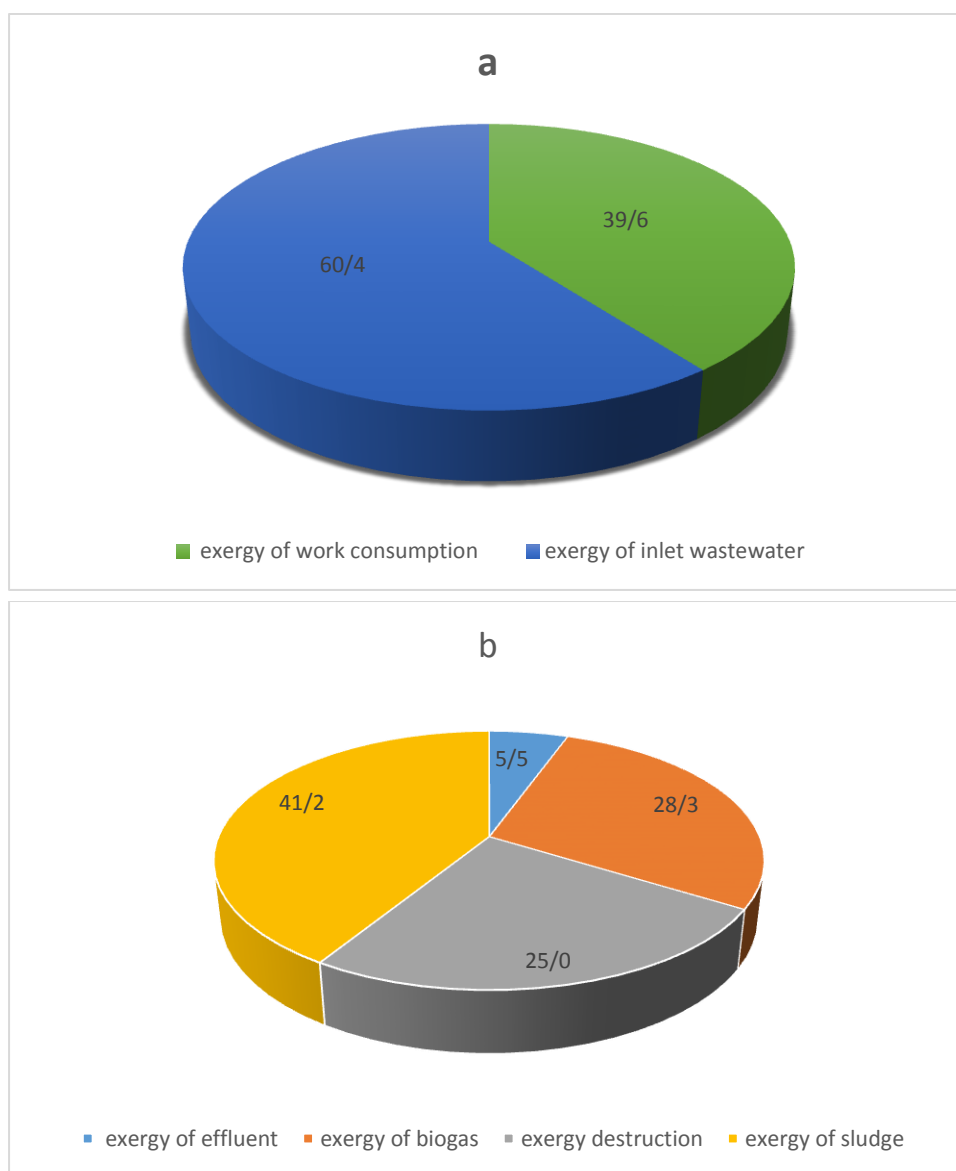
Number of WWTP	Mean electricity consumption	Mean inlet exergy	Mean effluent exergy	Mean biogas exergy	Mean exergy destruction	Exergy in sludge
1	46.6	39.3	2.7	14.4	9.8	12.3
2	114.8	175.3	9.7	49.6	43.2	72.2
3	114.8	98.2	10.9	51.7	24.6	11.1
4	73.2	91.1	3.6	51.6	22.8	13.1
5	368.0	924.8	65.3	454.3	231.2	174.0
6	252.0	759.1	68.9	242.3	189.9	258.1

در شکل (۴-۱۹) در قسمت a، سهم انرژی های ورودی به تصفیه‌خانه شماره ۱ که ناشی از کار مصرفی و فاضلاب ورودی می‌شود نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود انرژی ورودی به تصفیه‌خانه شماره ۱، بیشتر ناشی از انرژی کار مصرفی است که به‌صورت کار می‌باشد. از آنجا که انرژی به‌صورت کار به جریان فاضلاب وارد می‌شود، تمامی آن تلف شده و تنها انرژی فاضلاب قابل بازیابی خواهد بود. در قسمت b، سهم‌های مختلف از انرژی فاضلاب نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است بخش عمده انرژی به‌صورت بیوگاز قابل استحصال است و بخش عمده دیگر در لجن خروجی از تصفیه‌خانه باقی می‌ماند. همچنین، در حدود ۲۵٪ از انرژی در واحد هوادهی تخریب می‌گردد.



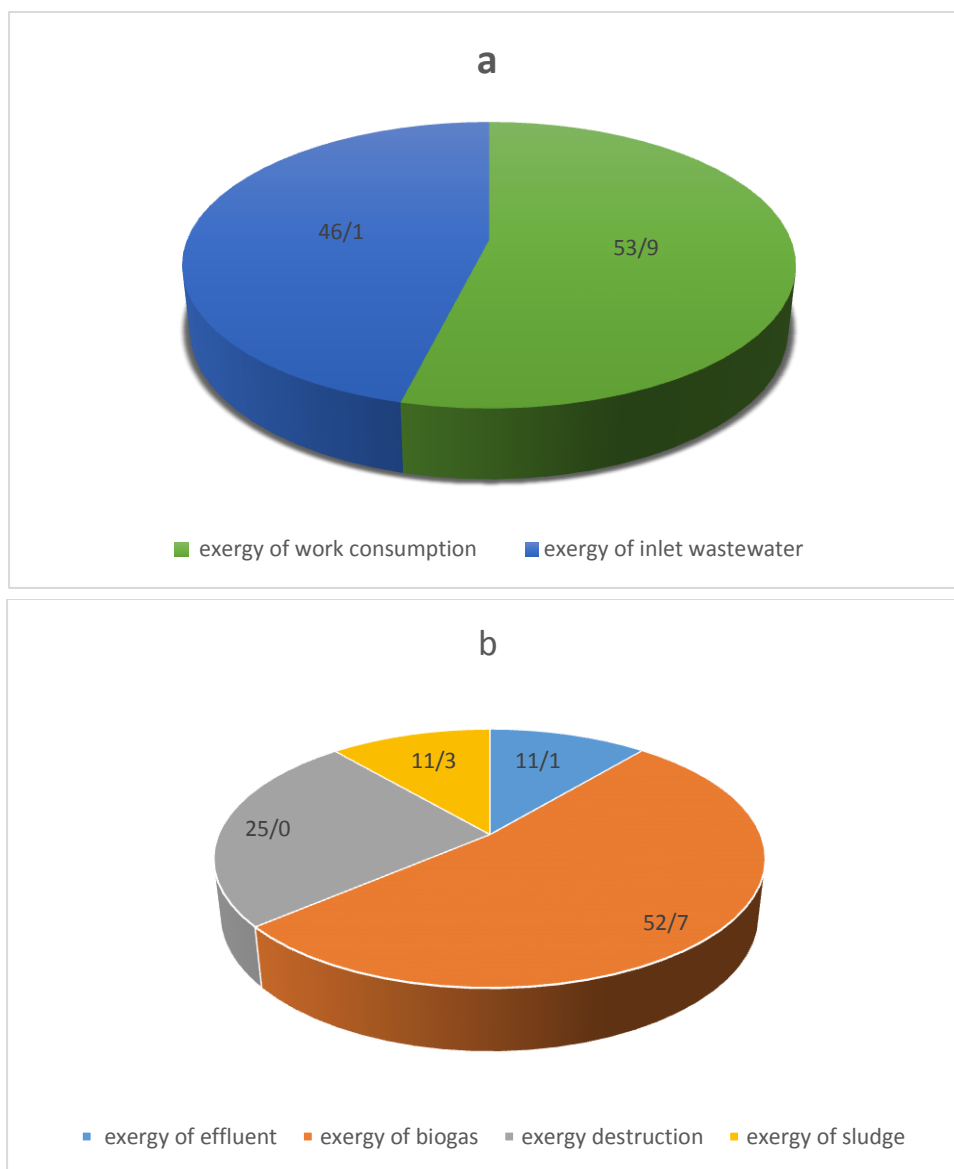
شکل (۴-۱۹) اگزرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب شماره یک (a) نسبت اگزرژی های ورودی (b) نسبت اگزرژی در فرایندهای مختلف نسبت به اگزرژی فاضلاب

در شکل (۴-۲۰) در قسمت a، سهم انرژی‌های ورودی به تصفیه‌خانه شماره ۲ که ناشی از کار مصرفی و فاضلاب ورودی می‌شود نشان داده شده است. در این تصفیه‌خانه، برخلاف تصفیه‌خانه شماره ۱، بیشتر انرژی ورودی به تصفیه‌خانه ناشی از فاضلاب است. همان‌طور که در شکل در قسمت b، مشخص است بیشترین انرژی فاضلاب ورودی از طریق لجن خروجی از تصفیه‌خانه از دسترس خارج می‌گردد و بعد از آن بیشترین انرژی مربوط به بیوگاز قابل استحصال در این تصفیه‌خانه است.



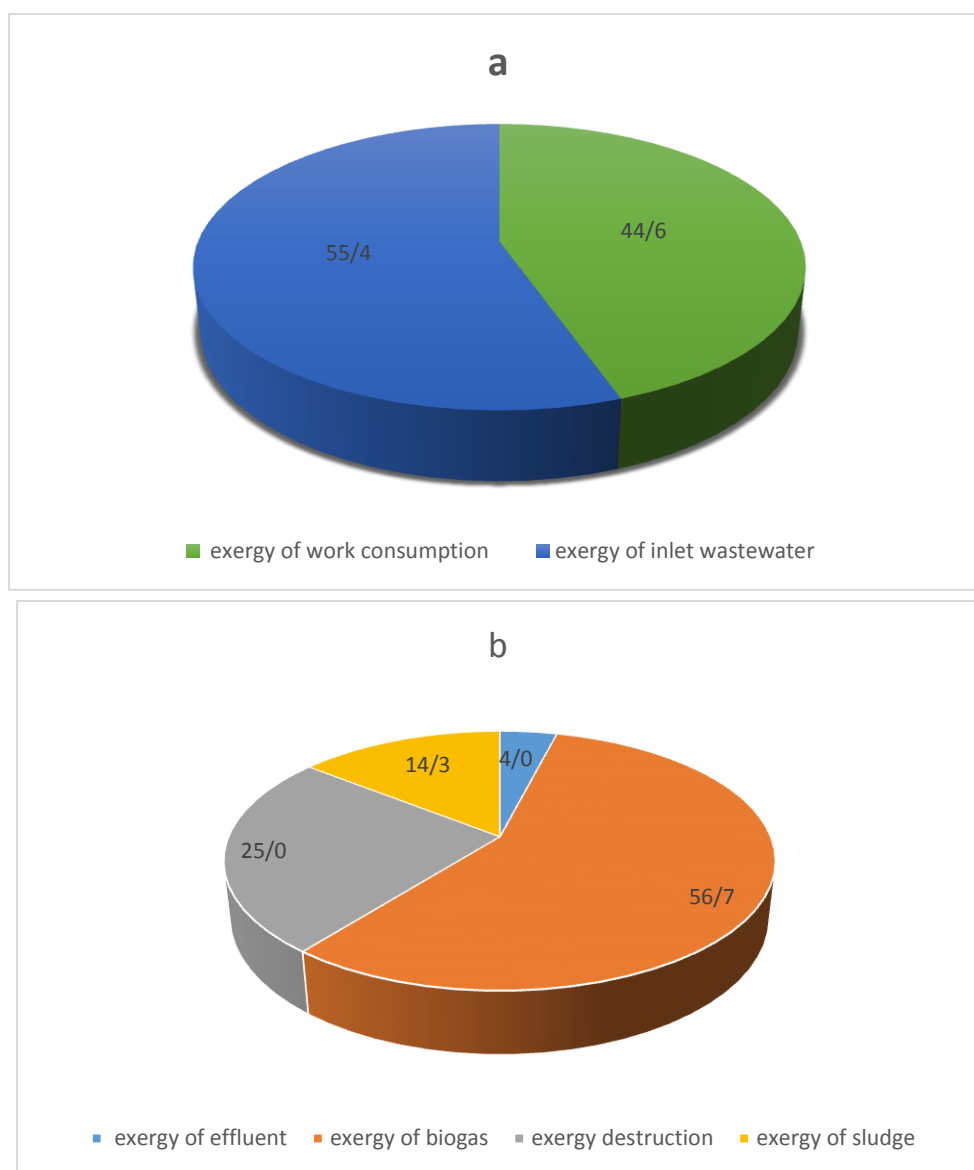
شکل (۴-۲۰) انرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب شماره دو (a) نسبت انرژی‌های ورودی (b) نسبت انرژی‌های فرایندهای مختلف نسبت به انرژی فاضلاب

در شکل (۴-۲۱) در قسمت a، سهم انرژی‌های ورودی به تصفیه‌خانه شماره ۳ که ناشی از کار مصرفی و فاضلاب ورودی می‌شود نشان داده شده است. در این تصفیه‌خانه، همانند تصفیه‌خانه شماره ۱، بیشتر انرژی ورودی به تصفیه‌خانه ناشی از کار مصرفی می‌باشد. همان‌طور در قسمت b، نشان داده شده است، بیشتر از نصف انرژی فاضلاب به بیوگاز تبدیل شده و تنها در حدود ۱۱٪ از انرژی فاضلاب به‌صورت لجن از تصفیه‌خانه خارج می‌شود.



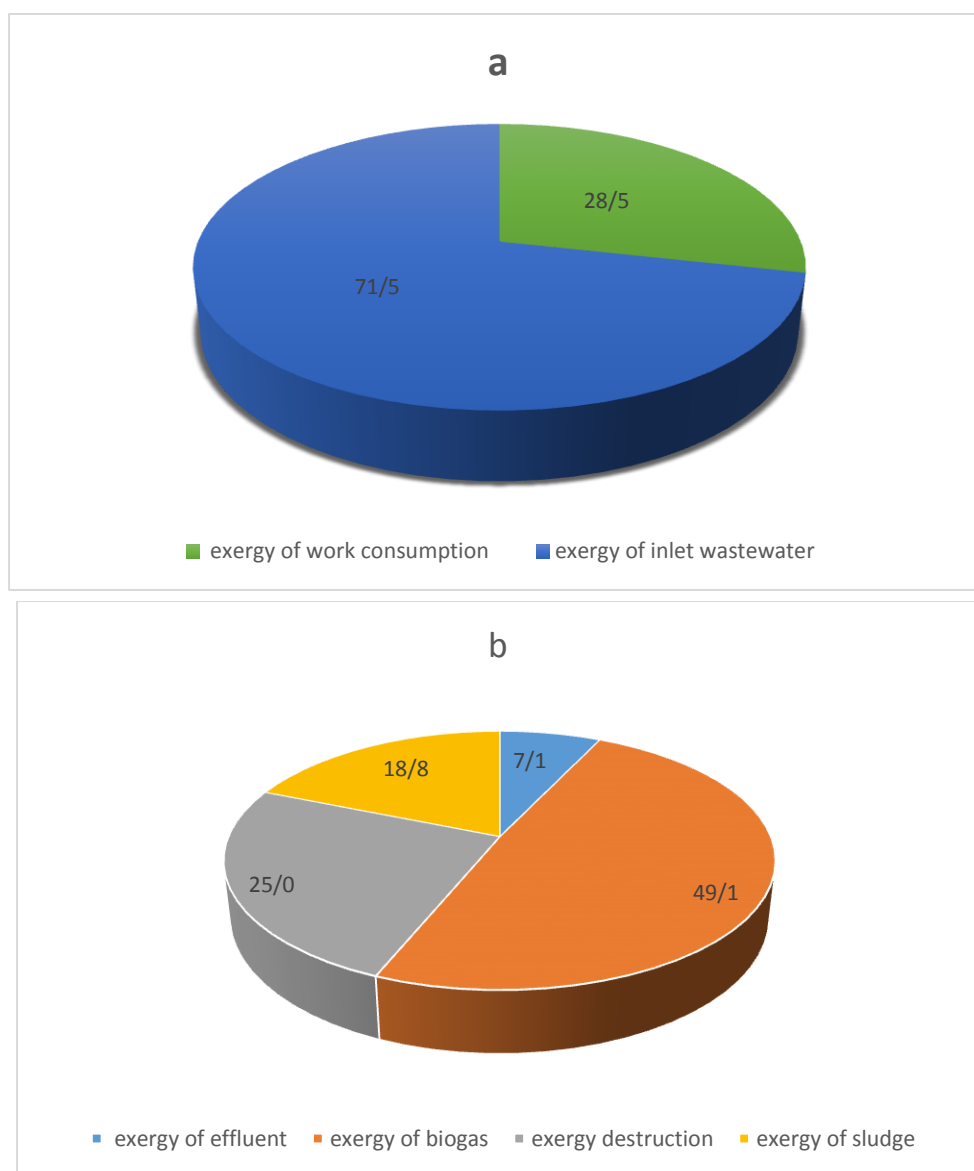
شکل (۴-۲۱) انرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب شماره سه (a) نسبت انرژی‌های ورودی (b) نسبت انرژی‌های فرایندهای مختلف نسبت به انرژی فاضلاب

در شکل (۴-۲۲) در قسمت a، سهم انرژی‌های ورودی به تصفیه‌خانه شماره ۴ نشان داده شده است. در این تصفیه‌خانه، در حدود ۵۶ درصد از انرژی ورودی به تصفیه‌خانه متعلق به فاضلاب ورودی می‌باشد. همان‌طور که در قسمت b نشان داده شده است در حدود ۵۷ از انرژی فاضلاب تبدیل به بیوگاز شده و میزان تخریب انرژی در واحد هوادهی ۲۵٪ از انرژی ورودی فاضلاب می‌باشد.



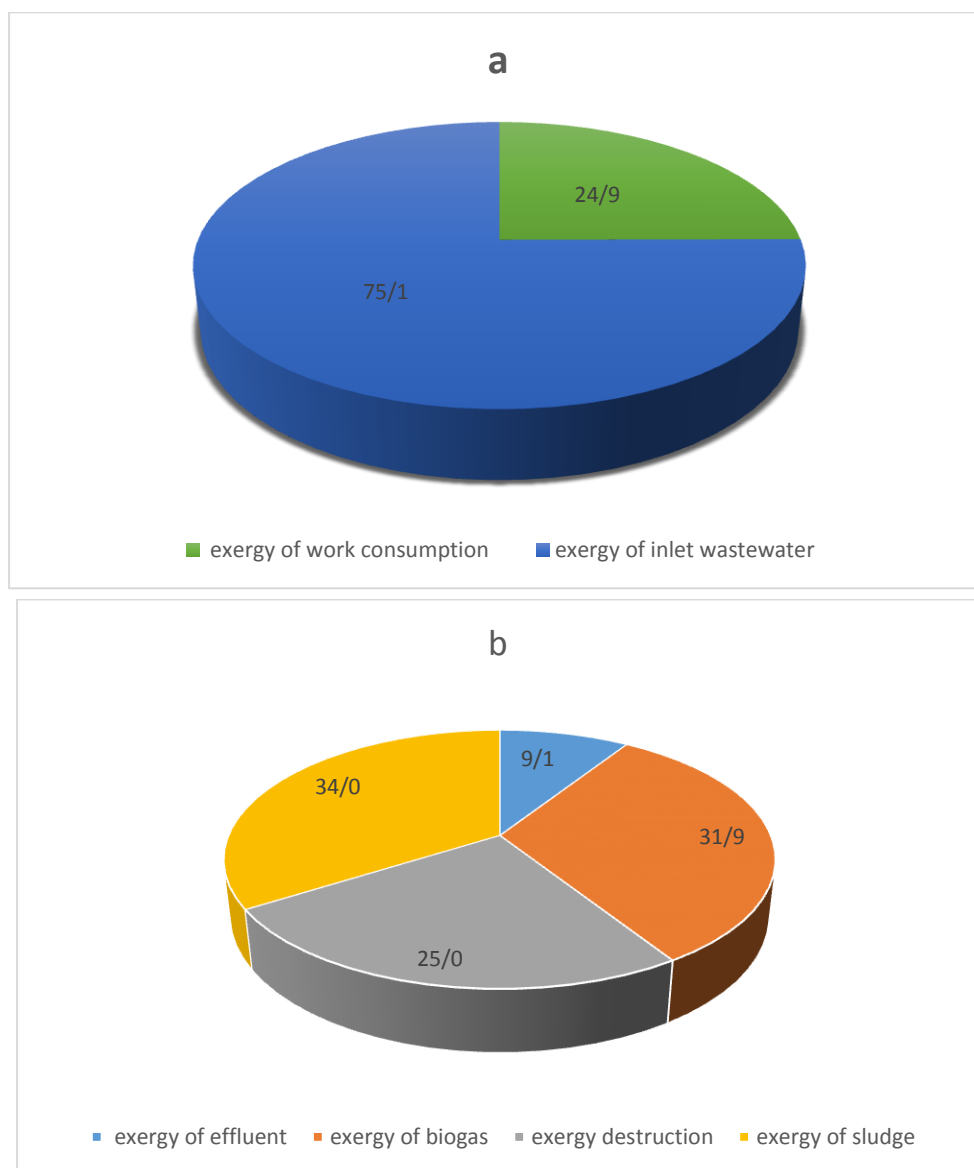
شکل (۴-۲۲) انرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب شماره چهار (a) نسبت انرژی‌های ورودی (b) نسبت انرژی‌های مختلف نسبت به انرژی فاضلاب

در شکل (۴-۲۳) در قسمت a، سهم انرژی‌های ورودی به تصفیه‌خانه شماره ۵ نشان داده شده است. در این تصفیه‌خانه، بخش عمده انرژی ورودی که در حدود ۷۲٪ می‌باشد از فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه ناشی می‌شود و قابلیت بازیافت دارد. در این تصفیه‌خانه ۷٪ از این انرژی از طریق پساب و در حدود ۱۹٪ از آن از طریق لجن از تصفیه‌خانه فاضلاب خارج می‌شود. همچنین در حدود ۲۵٪ از این انرژی در واحد هوادهی تخریب شده و مابقی به بیوگاز تبدیل می‌شود.



شکل (۴-۲۳) انرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب شماره پنج (a) نسبت انرژی‌های ورودی (b) نسبت انرژی در فرایندهای مختلف نسبت به انرژی فاضلاب

در شکل (۴-۲۴) در قسمت a، سهم انرژی‌های ورودی به تصفیه‌خانه شماره ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که بیشترین سهم از انرژی فاضلاب نسبت به سایر تصفیه‌خانه، مربوط به تصفیه‌خانه شماره ۶ است که مقدار آن در حدود ۷۵٪ می‌باشد. همان‌طور که در قسمت b نمایش داده شده است، در حدود ۹٪ از این انرژی از طریق پساب و در حدود ۳۴٪ از طریق لجن آبیگری شده از تصفیه‌خانه خارج می‌گردد. همچنین در حدود ۲۵٪ از این انرژی در واحد هوادهی تخریب شده و ۳۲٪ از آن تبدیل به بیوگاز می‌گردد.



شکل (۴-۲۴) انرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب شماره شش (a) نسبت انرژی‌های ورودی (b) نسبت انرژی در فرایندهای مختلف نسبت به انرژی فاضلاب

۴-۳- مطالعه اقتصادی

به علت متفاوت بودن فرایندهای مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مورد مطالعه و همچنین دبی‌های فاضلاب مختلف، استفاده از بیوگاز قابل استحصال در تصفیه‌خانه‌ها نیاز به بررسی اقتصادی دارند. با توجه به اینکه بیوگاز قابل استحصال از نوع انرژی‌های تجدیدپذیر محسوب می‌گردد، سازمان انرژی‌های نو ایران تعرفه مشخصی را برای خرید برق تولیدی از بیوگاز تعیین کرده است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه هم‌اکنون در تصفیه‌خانه جنوب تهران از سیستم CHP استفاده می‌شود از تحلیل اقتصادی این تصفیه‌خانه صرف‌نظر کرده و مطالعه بر روی ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب دیگر انجام گرفته است.

به‌منظور ارزیابی مالی سیستم‌های پیشنهادی، در جدول (۲) پارامترهای اقتصادی به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است.

جدول (۴-۱۰) پارامترهای اقتصادی [۴۹, ۴۸, ۴۵]

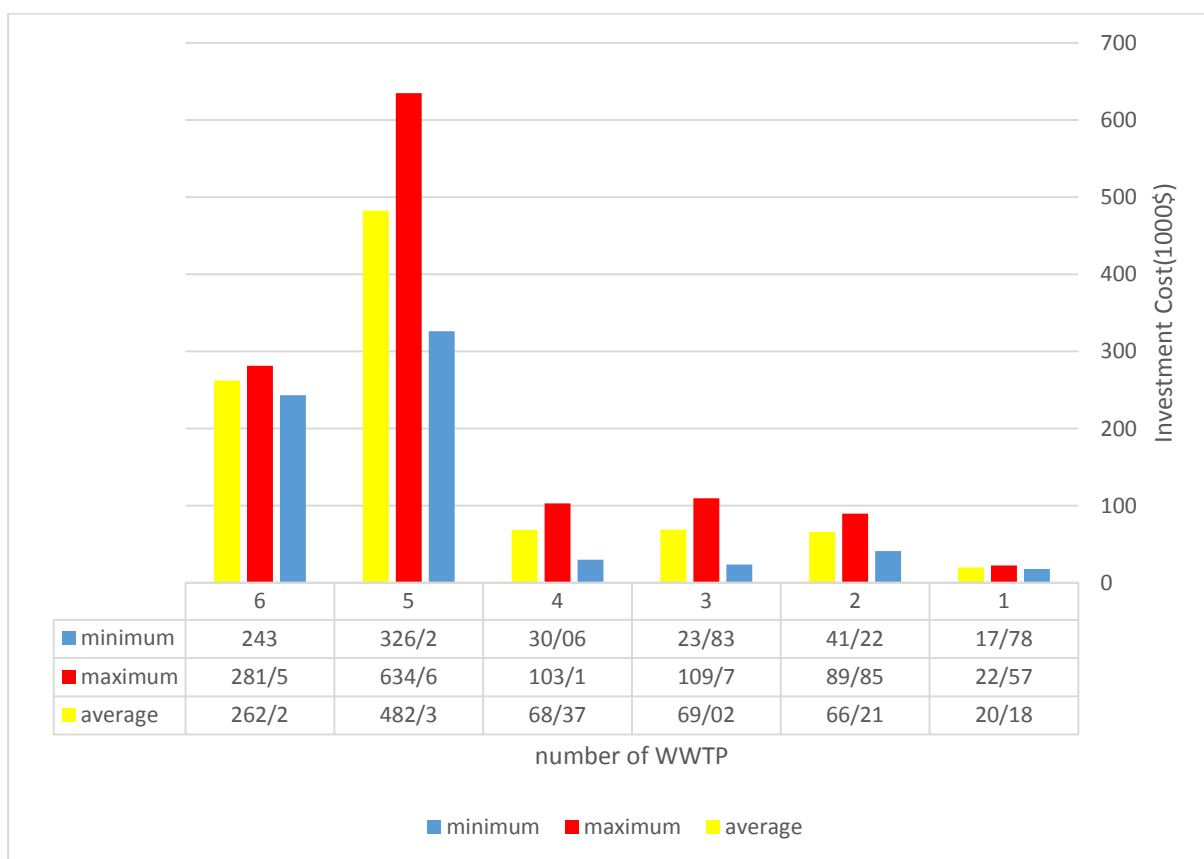
4	نرخ بهره با در نظرگیری نرخ تعدیل قیمت فروش برق (%)
20	تعداد سال‌های کارکرد
0.012	هزینه تعمیر و نگهداری سیستم نوع اول (\$/kwh)
4800	تعداد ساعات کارکرد سالیانه سیستم
180000	ارزش دلار نسبت به ریال
10500	نرخ خرید برق در سال اول (ریال)
0.7	ضریب کاهش قیمت خرید برق در ۱۰ سال دوم

ظرفیت تولید بیوگاز در سه حالت کمینه، بیشینه و میانگین برای هر یک از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در جدول زیر آمده است:

جدول (۴-۱۱) مقدار بیوگاز در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مورد مطالعه برحسب کیلوگرم در روز

Number of WWTP	Minimum	maximum	average
1	51.1	65.36	58.23
2	121.6	279.2	200.4
3	68.76	349	208.88
4	87.68	329.1	208.39
5	1226	2443	1834.5
6	909.1	1048	978.55

همان‌طور که در جدول بالا مشاهده می‌شود میزان تولید بیوگاز در حالت بیشینه و کمینه در تصفیه‌خانه‌های شماره ۲، ۳، ۴ و ۵ اختلاف بسیار زیادی باهم دارند که این امر منجر به تغییر اندازه سیستم CHP خواهد شد. در شکل زیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری در حالت‌های کمینه، بیشینه و میانگین آورده شده است.



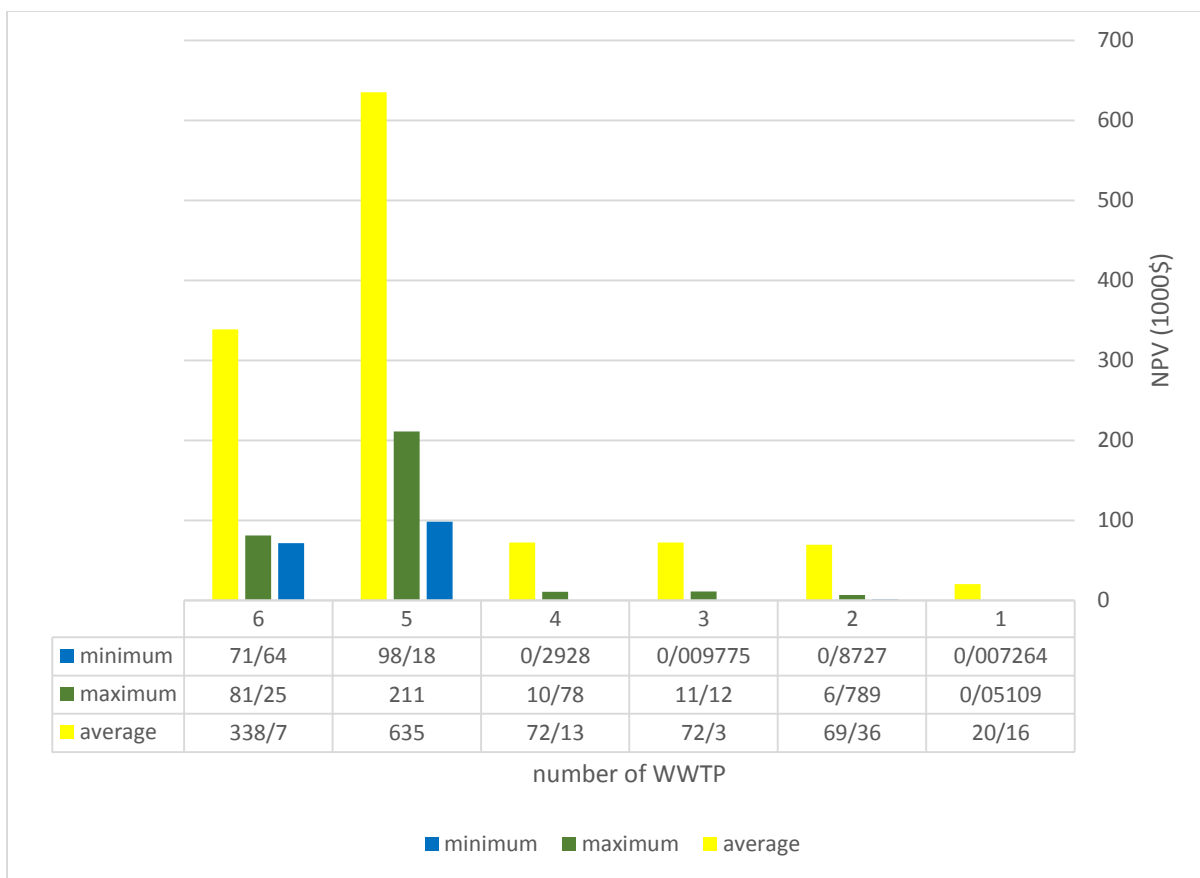
شکل (۴-۲۵) هزینه سرمایه‌گذاری در حالت‌های مختلف

به دلیل اختلاف زیاد در تولید بیوگاز حالت‌های بیشینه و کمینه در تصفیه‌خانه‌های شماره ۲، ۳، ۴ و ۵ هزینه سرمایه‌گذاری برای این تصفیه‌خانه‌ها در دو حالت مشخص‌شده تفاوت زیادی باهم خواهند داشت. یکی از پارامترهای مهم در تحلیل اقتصادی پروژه‌ها، محاسبه زمان بازگشت سرمایه می‌باشد. در شکل زیر زمان بازگشت سرمایه در حالت‌های مختلف نمایش داده شده است.



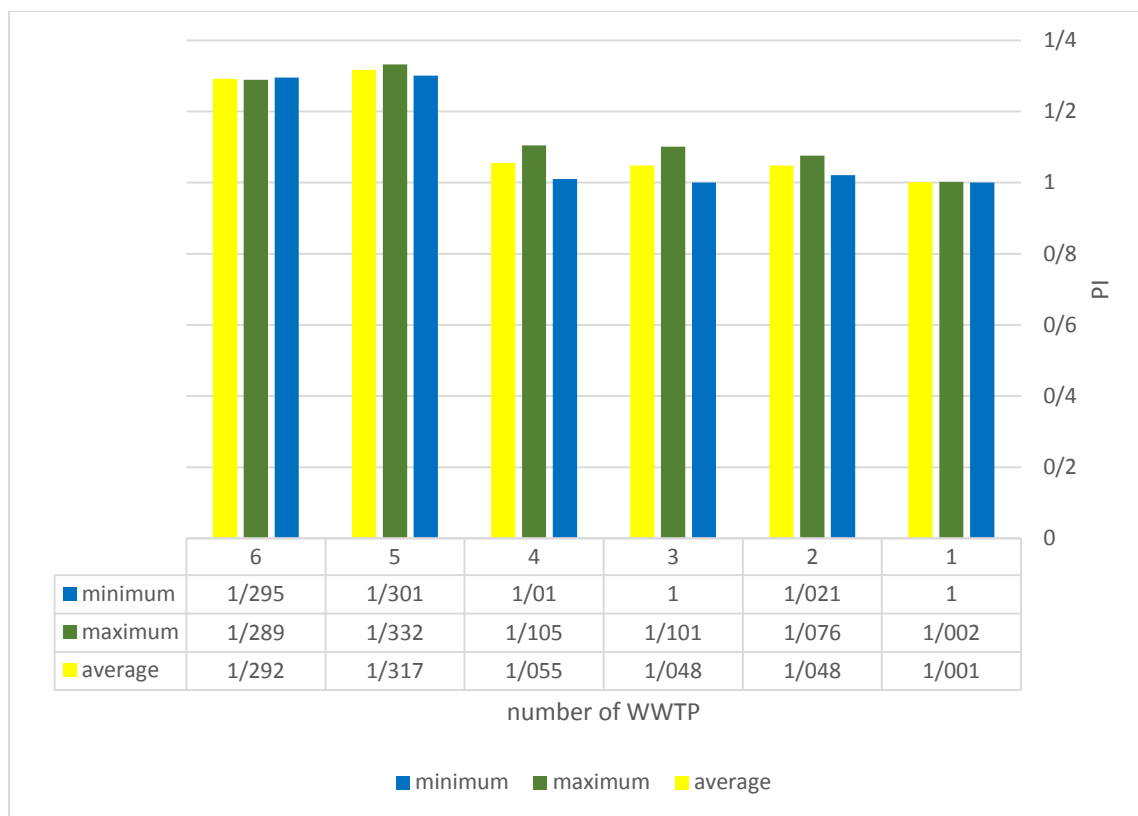
شکل (۴-۲۶) زمان بازگشت سرمایه سیستم در حالت‌های مختلف

همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالتی که ظرفیت سیستم CHP بر اساس ظرفیت کمینه تصفیه‌خانه انتخاب شود، زمان بازگشت سرمایه در تصفیه‌خانه‌های کوچک‌تر یعنی تصفیه‌خانه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در حدود ۲۰ سال می‌باشد که معادل با عمر در نظر گرفته شده سیستم است. از طرفی زمان بازگشت سرمایه در تصفیه‌خانه شماره ۵ در حالت کمینه در حدود ۱۲/۵ سال و در حالت بیشینه در حدود ۱۲ سال است. این پارامتر برای تصفیه‌خانه شماره ۶ در هر سه حالت تقریباً برابر و در حدود ۱۲/۷ سال می‌باشد.



شکل (۴-۲۷) NPV کل سیستم CHP در حالت‌های مختلف

همان‌طور که در شکل بالا نشان داده شده است، کل ارزش حال خاص در طول مدت پروژه در حالت‌های مختلف برای ۶ تصفیه‌خانه مدنظر محاسبه شده است. این پارامتر درواقع سود ناشی از فروش برق در بازه بیست‌ساله منهای هزینه تعمیر و نگهداری سیستم می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف بیت کل ارزش حال خالص در دو حالت بیشینه و کمینه در تصفیه‌خانه‌های شماره ۲، ۳، ۴ و ۵ بسیار بیشتر از تصفیه‌خانه‌های شماره ۱ و ۶ می‌باشد.



شکل (۴-۲۸) شاخص سودآوری سیستم‌های CHP

شکل بالا شاخص سودآوری خرید سیستم‌های CHP در تصفیه‌خانه‌های مذکور را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است شاخص سودآوری در کلیه تصفیه‌خانه‌ها برابر و یا بیشتر از ۱ بوده که این امر نشان‌دهنده آن است که از سود ناشی از پروژه در همه تصفیه‌خانه هزینه اولیه خرید سیستم CHP را جبران خواهد کرد. از طرفی بیشترین مقدار شاخص سودآوری در میان همه تصفیه‌خانه متعلق به تصفیه‌خانه‌های شماره ۵ و ۶ است که مقدار هردوی آن‌ها تقریباً حدود ۱/۳ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هرچه اندازه تصفیه‌خانه فاضلاب بزرگ‌تر باشد پروژه اقتصادی‌تر خواهد بود.

فصل ۵: نتیجه گیری

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یکی از منابع تولید انرژی تجدید پذیر هستند که می‌توان با استفاده از آن، همه یا بخش بزرگی از انرژی موردنیاز تصفیه‌خانه‌ها اعم از حرارتی و یا برق مصرفی را تأمین نمود. در این تحقیق با ارزیابی جریان انرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران و همچنین ۶ تصفیه‌خانه دیگر واقع در شهر تهران پرداخته شده است. بدین منظور در ابتدا روابط مورد استفاده در این کار معرفی شده‌اند. سپس با توجه به داده‌های گردآوری شده برای تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران، انرژی با توجه به موازنه جرمی و انرژی برای تمامی نقاط تصفیه‌خانه فاضلاب به‌دست‌آمده است. سپس با استفاده پارامترهای معرفی شده بازده انرژی واحدهای تصفیه‌خانه به‌دست‌آمده است. در ادامه میزان تخریب انرژی هر واحد به‌دست‌آمده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین برای ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب تحلیلی اقتصادی برای خرید سیستم CHP به منظور استفاده از بیوگاز قابل استحصال در آن‌ها انجام شده است.

۵-۱- جمع بندی

- نتایج نشان داده که انرژی فیزیکی در مقایسه با انرژی شیمیایی در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.
- بخش کوچکی از انرژی فاضلاب در واحدهای آشغال و دانه‌گیری از چرخه تصفیه‌خانه خارج شده و قابل بازیافت انرژی نیستند.
- بخش عمده‌ای از انرژی تصفیه‌خانه فاضلاب در راکتور هوادهی تخریب می‌شود که در حدود ۳۰٪ انرژی فاضلاب ورودی می‌باشد.
- در حدود 3700 kW انرژی از طریق دفع لجن آگیری شده از تصفیه‌خانه تلف می‌گردد.
- تخریب انرژی در راکتور هوادهی در حدود ۹۳٪ از کل تخریب انرژی در تصفیه‌خانه را شامل می‌شود.
- در بررسی ۶ تصفیه‌خانه دیگر مشخص شد که هرچه ظرفیت تصفیه‌خانه بزرگ‌تر باشد، انرژی کار مصرفی در مقایسه با انرژی فاضلاب ورودی سهم کمتری در انرژی های ورودی با تصفیه‌خانه خواهند داشت.
- با افزایش انرژی بیوگاز، میزان انرژی لجن آگیری شده کاهش پیدا می‌کند.

- هرچه اندازه تصفیه خانه ها بزرگتر باشد شاخص سودآوری احداث سیستم های CHP بزرگتر و در نتیجه پروژه سودآورتر خواهد بود.

۵-۲- پیشنهادات

- بررسی امکان استفاده از سایر انرژی های تجدیدپذیر اعم از هیدروپاور، خورشیدی و بادی
- مطالعه انرژی و انرژی به منظور استفاده ترکیبی از دو یا چند نوع انرژی تجدیدپذیر
- بررسی راه کارهای افزایش قابلیت استحصال بیوگاز در تصفیه خانه های فاضلاب
- تحلیل اقتصادی، انرژی و احداث هاضم های بی هوازی در تصفیه خانه های فاضلاب
- بررسی اثرات محیط زیستی ناشی از استفاده انواع انرژی های تجدیدپذیر در تصفیه خانه های فاضلاب

مراجع

- [١] A. R. Bresters, *Sludge treatment and disposal: management approaches and experiences*: Office for official publications of the European communities, 1998 .
- [٢] C. V. Andreoli, M. Von Sperling, F. Fernandes, M. Ronteltap, *Sludge treatment and disposal* : IWA publishing, 2007 .
- [٣] M. Von Sperling, *Wastewater characteristics, treatment and disposal*: IWA publishing, 2007 .
- [٤] I. Metcalf, *Wastewater engineering; treatment and reuse*: McGraw-Hill, 2003 .
- [٥] A. R. Bresters, Coulomb, I., Deak, B., Matter, B ,.Saabye, A., Spinosa, L., and Utvik, Å.Ø.,, *Sludge Treatment and Disposal: Management Approaches and Experiences*. Environmental, *European Environment Agency*., 1997 .
- [٦] S. R. Qasim, *Wastewater treatment plants: planning, design, and operation*: Routledge . ٢٠١٧ ,
- [٧] B. Calli, B. Mertoglu, B. Inanc, O. Yenigun, Effects of high free ammonia concentrations on the performances of anaerobic bioreactors, *Process Biochemistry*, Vol. 40, No. 3-4, pp. 1285-1292, 2005 .
- [٨] A. Plappally, Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 7, pp. 4818-4848, 2012 .
- [٩] I. Bodik, M. Kubaska, Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant, *Environment Protection Engineering*, Vol. 39, No. 2, 2013 .
- [١٠] V. Pitas, B. Fazekas, Z. Banyai, A. Karpati, Energy efficiency of the municipal wastewater treatment, *Journal of Biotechnology*, No. 150, pp. 163-164, 2010 .
- [١١] B. Kneppers, D. Birchfield, M. Lawton, Energy-water relationships in reticulated water infrastructure systems, *Water Supply (kWh/Capita)*, Vol. 76, No. 20.86, pp. 75.15, 2009 .
- [١٢] F. Liu, A. Ouedraogo, S. Manghee, A. Danilenko, A primer on energy efficiency for municipal water and wastewater utilities, 2012 .
- [١٣] D. Mamais, C. Noutsopoulos, A. Dimopoulou, A. Stasinakis, T. Lekkas, Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions, *Water Science and Technology*, Vol. 71, No. 2, pp. 303-308, 2015 .
- [١٤] Y. Gu, Y. Li, X .Li, P. Luo, H. Wang, X. Wang, J. Wu, F. Li, Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges, *Energy Procedia*, Vol. 105, pp. 3741-3751, 2017 .
- [١٥] T. Newell, J. R. Batista, S. Ahmad, W. Johnson, Energy Consumption in Large Wastewater Treatment Plants as a Function of Wastewater Strength, 2012 .
- [١٦] K. Mizuta, M. Shimada, Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan, *Water Science and Technology*, Vol. 62, No. 10, pp. 2256-2262, 2010 .

- [۱۷] M. Jonasson, I. Ulf Jeppsson, *Energy Benchmark for Wastewater Treatment Processes*, Thesis, MS Thesis, 2007, Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation ..., 2007 .
- [۱۸] M. Tajrishy, Wastewater treatment and reuse in Iran: Situation analysis, *Tehran: Departement of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Environment and Water Research Center (EWRC)*, 2010 .
- [۱۹] M. R. Barati, M. Aghbashlo, H. Ghanavati, M. Tabatabaei, M. Sharifi, G. Javadirad, A. Dadak, M. M. Soufiyan, Comprehensive exergy analysis of a gas engine-equipped anaerobic digestion plant producing electricity and biofertilizer from organic fraction of municipal solid waste, *Energy Conversion and Management*, Vol. 151, pp. 753-763, 2017 .
- [۲۰] G. Silvestre, B. Fernández, A. Bonmatí, Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants, *Energy Conversion and Management*, Vol. 101, pp. 255-262, 2015 .
- [۲۱] S. Di Fraia, N. Massarotti, L. Vanoli, M. Costa, Thermo-economic analysis of a novel cogeneration system for sewage sludge treatment, *Energy*, Vol. 115, pp. 1560-1571, 2016 .
- [۲۲] C. Ofori-Boateng, K. T. Lee, M. Mensah, The prospects of electricity generation from municipal solid waste (MSW) in Ghana: A better waste management option, *Fuel processing technology*, Vol. 110, pp. 94-102, 2013 .
- [۲۳] A. Abusoglu, S. Demir, M. Kanoglu, Thermodynamic analysis and assessment of a municipal wastewater treatment system: a field study on sewage treatment, *International Journal of Exergy*, Vol. 13, No. 3, pp. 281-298, 2013 .
- [۲۴] L. Fitzsimons, M. Horrigan, G. McNamara, E. Doherty, T. Phelan, B. Corcoran, Y. Delauré, E. Clifford, Assessing the thermodynamic performance of Irish municipal wastewater treatment plants using exergy analysis: a potential benchmarking approach, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 131, pp. 387-398, 2016 .
- [۲۵] F. Piadeh, M. R. A. Moghaddam, S. Mardan, Present situation of wastewater treatment in the Iranian industrial estates: Recycle and reuse as a solution for achieving goals of eco-industrial parks, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 92, pp. 172-178, 2014 .
- [۲۶] S. Saghafi, A. Ebrahimi, G. Najafpour, F. Hashemian, Electrical Energy Management in Industrial Wastewater Treatment Plant, *International Journal of Engineering*, Vol. 32, No. 9, pp. 1269-1276, 2019 .
- [۲۷] N. F. T. Ozdil, A. Tantekin, Exergy and exergoeconomic assessments of an electricity production system in a running wastewater treatment plant, *Renewable Energy*, Vol. 97, pp. 390-398, 2016 .
- [۲۸] S. Lee, I. J. Esfahani, P. Ifaei, W. Moya, C. Yoo, Thermo-environ-economic modeling and optimization of an integrated wastewater treatment plant with a combined heat and power generation system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 142, pp. 385-401 . ۲۰۱۷ ,
- [۲۹] X. Hao, J. Li, M. C. van Loosdrecht, H. Jiang, R. Liu, Energy recovery from wastewater: Heat over organics, *Water research*, Vol. 161, pp. 74-77, 2019 .
- [۳۰] J. G. F. Madeira, A. R. S. Delgado, R. A. M. Boloy, E. R. Coutinho, C. C. A. Loures, Exergetic and economic evaluation of incorporation of hydrogen production in a cassava wastewater plant, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 123, pp. 1072-1078, 2017 .
- [۳۱] A. Abusoglu, S. Demir, M. Kanoglu, Thermoeconomic assessment of a sustainable municipal wastewater treatment system, *Renewable Energy*, Vol. 48, pp. 424-435, 2012 .

- [۳۲] M. T. Farahbakhsh, M. Chahartaghi, Performance analysis and economic assessment of a combined cooling heating and power (CCHP) system in wastewater treatment plants (WWTPs), (*Energy Conversion and Management*, Vol. 224, pp. 113351, 2020 .
- [۳۳] Z. Khounani, H. Hosseinzadeh-Bandbafha, F. Nazemi, M. Shaeifi, K. Karimi, M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, S. S. Lam, Exergy analysis of a whole-crop safflower biorefinery: A step towards reducing agricultural wastes in a sustainable manner, *Journal of environmental management*, Vol. 279, pp. 111822, 2021 .
- [۳۴] J. G. F. Madeira, E. M. de Oliveira, M. V. Springer, L. T. da Conceição, A. R. S. Delgado, Exergy analysis of hydrogen production from manipueira biogas, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 40, No. 2, pp. e13495, 2021 .
- [۳۵] S. Di Fraia, A. Macaluso, N. Massarotti, L. Vanoli, Geothermal energy for wastewater and sludge treatment: An exergoeconomic analysis, *Energy Conversion and Management*, Vol. 224, pp. 113180, 2020 .
- [۳۶] P. Ahmadi, *Modeling, analysis and optimization of integrated energy systems for multigeneration purposes*, Thesis, 2013 .
- [۳۷] I. O. Ohijeagbon, M. A. Waheed, S. O. Jekayinfa, Methodology for the physical and chemical exergetic analysis of steam boilers, *Energy*, Vol. 53, pp. 153-164, 2013 .
- [۳۸] M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, P. Mohammadi, B. Khoshnevisan, M. A. Rajaeifar, M. Pakzad, Neat diesel beats waste-oriented biodiesel from the exergoeconomic and exergoenvironmental point of views, *Energy Conversion and Management*, Vol. 148, pp. 1-15, 2017 .
- [۳۹] M. Dowlati, M. Aghbashlo, M. M. Soufiyan, Exergetic performance analysis of an ice-cream manufacturing plant: a comprehensive survey, *Energy*, Vol. 123 ,pp. 445-459, 2017 .
- [۴۰] F. Nasiri, M. Aghbashlo, S. Rafiee, Exergy analysis of an industrial-scale ultrafiltrated (UF) cheese production plant: a detailed survey, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 2, pp. 407-424, 2017 .
- [۴۱] M. M. Soufiyan, M. Aghbashlo, H. Mobli, Exergetic performance assessment of a long-life milk processing plant: a comprehensive survey, *Journal of cleaner production*, Vol. 140, pp. 590-607, 2017 .
- [۴۲] I. Dincer, M. A. Rosen, *Exergy: energy, environment and sustainable development*: Newnes, 2012 .
- [۴۳] D. Marmolejo-Correa, T. Gundersen, A comparison of exergy efficiency definitions with focus on low temperature processes, *Energy*, Vol. 44, No. 1, pp. 477-489, 2012 .
- [۴۴] T.-V. Nguyen, M. Voldsund, B. Elmegaard, I. S. Ertesvåg, S. Kjelstrup, On the definition of exergy efficiencies for petroleum systems: Application to offshore oil and gas processing, *Energy*, Vol. 73, pp. 264-281, 2014 .
- [۴۵] C. Beggs, *Energy: management, supply and conservation*: Routledge, 2010 .
- [۴۶] Metcalf, Eddy, F. L. Burton, H. D. Stensel, G. Tchobanoglous, *Wastewater engineering: treatment and reuse*: McGraw Hill, 2003 .
- [۴۷] A. Mohagheghian, R. Nabizadeh, A. Mesdghinia, N. Rastkari, A. H. Mahvi, M. Alimohammadi, M. Yunesian, R. Ahmadkhaniha, S. Nazmara, Distribution of estrogenic steroids in municipal wastewater treatment plants in Tehran, Iran, *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-7, 2014 .

- [٤٨] C. Rodgers, 25-5 kWe microturbine design aspects, in *Proceeding of*, American Society of Mechanical Engineers, pp. V001T04A012-V001T04A012 .
- [٤٩] <http://www.satba.gov.ir/> .

Abstract

The amount of wastewater production has been increased by population increasing in countries and the rising of water consumption per capita. Produced wastewater apart from is considered as a main source of water, especially in countries with dry weather and low rain, it can count as a high pollution source that inappropriate disposal causes serious damage to the environment. Many wastewater treatment plants (WWTP) have been designed to decrease the environmental pollution. By increasing the number of WWTPs it has been ascertained that wastewater treatment consumes a high amount of energy. In recent years, efforts have been made to optimize energy consumption in WWTPs and to use the energy potential of wastewater generated by the sludge of these plants. Since the sludge is permanently produced in the treatment plant, WWTPs have become a source of renewable energy production that can recycle all or a large part of the energy required by the treatment plant. In this research, exergy analysis in the raw wastewater entering the WWTPs in the south of Tehran has been studied. Six other WWTPs have also been examined in general in terms of exergy. The results show that physical exergy compared to chemical exergy in the WWTPs south of Tehran is insignificant and negligible. Also, a small part of the wastewater exergy in the Screening units and Grit chamber units is removed from the treatment plant cycle and energy is not recyclable. Other results include the destruction of most of the exergy of WWTPs in the aerobic reactor, which is about 30% of the exergy of the inlet wastewater. Also, about 3700 kW of exergy is removed through the expulsion of dewatered sludge from the treatment plant. In the study of 6 other treatment plants, it was found that the larger the capacity of the treatment plant, the exergy of consumable work will have a smaller share in the exergies entering the treatment plant compared to the exergy of the Inlet wastewater. Also, with increasing biogas exergy, the exergy rate of dewatered sludge decreases. The economic analysis shows that the higher capacity of WWTP results in a higher profitability index in the CCHP system and thus the project becomes more profitable.

Keywords: Wastewater treatment plants (WWTPs); Exergy analysis; Sludge; economic analysis



Kharazmi International Campus
Ph.D. Thesis in Energy Conversion Engineering

Thermodynamic and economic analyses of a sample wastewater treatment plant for biogas production

By: Sajjad malboosi

Supervisor:
Dr. Seyed Majid Hashemian
Dr. Mahmood Mehregan

December 2021