

Research Paper

مقاله پژوهشی

The Importance of Optimizing Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants- A Case Study of East Mashhad Wastewater Treatment Plant

Naser Mehrdadi¹, Vahid Aghabalaee², Shima Mardani² and Mahla Tabeshnia²

1- Professor, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Ph.D. Student, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

* Corresponding author, Email: aghabalaeevahid@ut.ac.ir

Received: 19/02/2020

Revised: 16/08/2020

Accepted: 06/09/2020

© IWWA

Abstract

Construction of wastewater treatment plant, if energy and water resources are recovered, can justify some undesirable effects such as greenhouse gas emissions. sludge management and treatment is one of the most complex and costly parts of treatment plants that can cover up to 60% of initial capital and operation costs of a wastewater treatment plant. Considering the importance of reducing energy consumption in wastewater treatment plants as an environmental and economic point of view, some investigations have done to construct and modify wastewater plants worldwide in order to the self-sufficiency of energy supply recently year. This article is a practical study that the costs of capital and energy consumption were analyzed in comparison with other processes for MLE¹ process with aerobic digestion in wastewater treatment plant in east of Mashhad with flow rate of 80000 m³/d. The results show that energy consumption in this system is about 2 times of similar wastewater treatment plants with optimal process. Also, however, the energy level will decrease from 1 kwh/m³ to 0.58 kwh/m³ with the change of aerobic digestion to anaerobic, but it is necessary to use of CHP system for decrease of energy consumption and recovery in comparison with constructed or optimized of wastewater treatment plants in worldwide. Therefore, it is necessary to pay more attention in selecting the process of liquid and sludge section in wastewater treatment plants under studying or optimizing wastewater treatment plants built in the country because of the numerous benefits of reducing energy consumption in wastewater treatment plants, in order to be self-sufficient in energy supply.

Keywords: Aerobic and Anaerobic Digestions, Energy Generating Resources, Environmental Effects, Wastewater Treatment Process.

اهمیت بهینه‌سازی مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های

فاضلاب - مطالعه موردی تصفیه‌خانه فاضلاب شرق مشهد

ناصر مهردادادی^۱، وحید آقابالائی^{۲*}، شیمای مردانی^۲ و مهلا تابش‌نیا^۲

۱- استاد دانشکده محیط‌زیست، دانشکده‌های پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست- آب و فاضلاب، دانشکده محیط‌زیست، دانشکده‌های پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول، ایمیل: aghabalaeevahid@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۳۰

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹/۰۵/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۶

© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در صورت بازیابی منابع آبی و انرژی، می‌تواند اثرات محیطی نامطلوب هم‌چون انتشار گازهای گلخانه‌ای را توجیه‌پذیر نماید. تصفیه و مدیریت لجن یکی از پیچیده‌ترین و هزینه‌برترین بخش‌های تصفیه‌خانه بوده و می‌تواند تا ۶۰ درصد هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و بهره‌برداری یک تصفیه‌خانه فاضلاب را شامل شود. با توجه به اهمیت کاهش مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از نظر محیط‌زیستی و اقتصادی، در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه خودکفایی تأمین انرژی از فاضلاب انجام شده و براساس این هدف تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متعددی در جهان احداث یا بهینه‌سازی شده‌اند. در این مقاله فرآیند MLE^۱ همراه با هاضم هوازی در تصفیه‌خانه فاضلاب شرق مشهد با دبی ۸۰،۰۰۰ مترمکعب در روز از نظر میزان مصرف انرژی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه در مقایسه با فرآیندهای پیشنهادی دیگر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان داد میزان انرژی مصرفی در این تصفیه‌خانه حدود ۲ برابر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مشابه با فرآیند بهینه است. هم‌چنین اگرچه با تغییر هاضم هوازی به بی‌هوازی، میزان انرژی از ۱ kwh/m^۳ به ۰/۵۸ kwh/m^۳ کاهش خواهد یافت؛ اما لازم است برای کاهش بیشتر انرژی مصرفی و بازیابی انرژی در مقایسه با تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بهینه‌سازی یا احداث شده در جهان، از سیستم CHP استفاده نمود. لذا با توجه به مزایای متعدد کاهش مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ضروری است به‌منظور خودکفایی در تأمین انرژی، در انتخاب فرآیند بخش مایع و لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در دست مطالعه و یا بهینه‌سازی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب احداث شده در کشور توجه بیشتری شود.

واژه‌های کلیدی: فرآیند تصفیه فاضلاب، هاضم‌های هوازی و بی‌هوازی، منابع تولید انرژی، اثرات زیست‌محیطی.

EAAS^۱؛ لذا در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با روش‌های ASBR^۲ و SRT^۳ بالا و مصرف زیاد انرژی به دلیل نیاز به حجم قابل توجه هوادهی، گرچه لجن تثبیت شده و فاقد بو است؛ اما در صورت عدم تأمین استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا در بخش لجن، معیار کاهش جذب ناقلین حاصل نشده و لجن خروجی استاندارد کلاس B را تأمین نمی‌کند و نمی‌توان لجن حاصل را به عنوان جامدات بیولوژیکی محسوب نمود (Turovskiy and Mathai, 2006; Tchobanoglous et al., 2014).

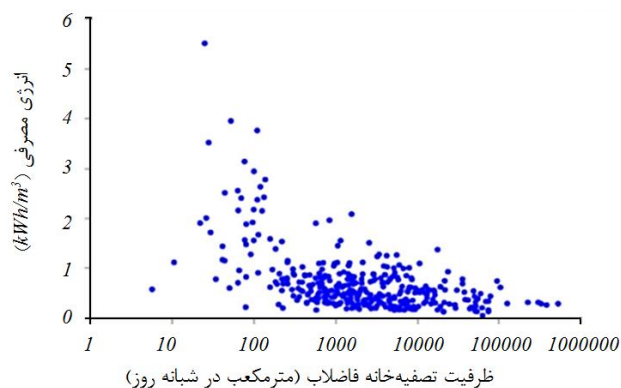
از سه روش تثبیت بیولوژیکی، شیمیایی و گرمایی، سیستم‌های متعارف تصفیه لجن برای دستیابی به کلاس B، هاضم‌های هوازی و بی‌هوازی هستند که هر یک مزایا و معایبی دارند (Sperling, 2007; Qasim and Zhu, 2018). یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار در انتخاب فرآیند بخش مایع و لجن و میزان انرژی مصرفی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، جمعیت تحت پوشش یا دبی فاضلاب ورودی است. به‌طور نمونه، Awe et al. (2016) مصرف انرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب به ظرفیت ۴۰۰۰ و ۳۷۸۵۰۰ مترمکعب در روز را به ترتیب برابر ۰/۸ و ۰/۲۷۲ کیلووات ساعت به‌ازای هر مترمکعب فاضلاب گزارش کردند. در انتخاب فرآیند بخش لجن، فرآیند مورد استفاده در بخش مایع بسیار اهمیت دارد. برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کوچک و با ظرفیت کمتر از ۲۰۰۰۰ مترمکعب در روز و به‌طور معمول برای فرآیندهای فاقد تانک ته‌نشینی اولیه (بدون تولید لجن خام) از هاضم هوازی به منظور تأمین کلاس B لجن استفاده می‌شود؛ اما در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب دارای تانک ته‌نشینی اولیه، استفاده از هاضم بی‌هوازی پیشنهاد شده است (Turovskiy and Mathai, 2018; Qasim and Zhu, 2006). نتایج تحقیقات نشان می‌دهد در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب آمریکا و اروپا به ترتیب حدود ۱۳/۸۴ و ۱۰ میلیون تن در سال جامد خشک تولید می‌شود که برای تثبیت این حجم لجن در آمریکا، به‌طور معمول سیستم مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های متوسط و بزرگ (دبی بیش از ۲۲۷۳۰ مترمکعب در روز) هاضم بی‌هوازی است (Shen et al., 2015). Timothy et al., 2017). بررسی‌ها حاکی از این است که ۲۵ تا ۵۰ درصد هزینه‌های بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌های متعارف لجن فعال مربوط به برق بوده و در کشورهای مختلف، ۰/۸ تا ۴ درصد کل برق تولیدی، در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مصرف می‌شود. طبق تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۱۵ در آمریکا، ۳ تا ۴ درصد کل برق تولیدی در این کشور (حدود ۳۱ میلیارد کیلووات ساعت در سال) در تصفیه‌خانه‌ها مصرف می‌شوند که معادل انتشار بیش از ۲۱ میلیون تن گازهای گلخانه‌ای است (Shen et al., 2015).

پیوند آب و انرژی یکی از عنصرهای اصلی توسعه پایدار جوامع انسانی محسوب می‌شود (Chen and Chen, 2016; Jiang et al., 2016) و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نمونه‌ای از تعامل و تأثیر متقابل این پیوند هستند (Xu et al., 2017). تحقیق انجام شده توسط Hao et al. (2017) با روش ارزیابی چرخه حیات در خصوص توجیه محیط‌زیستی احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نشان داد، بازیابی منابع (استفاده مجدد از پساب) دیگر به تنهایی در توجیه محیط‌زیستی ساخت تصفیه‌خانه‌ها کافی نیست و احداث تنها در صورت بازیابی هم‌زمان منابع آبی و انرژی (مانند استفاده از هاضم بی‌هوازی)، می‌تواند اثرات محیطی نامطلوب هم‌چون انتشار گازهای گلخانه‌ای و نیاز به استفاده از مواد و انرژی ساخت را توجیه‌پذیر نماید. تصفیه فاضلاب به دو بخش کلی تصفیه مایع و لجن تقسیم می‌شود و به‌طور معمول به فرآیند بخش مایع و انطباق کیفیت پساب تصفیه شده با استانداردهای موجود توجه بیشتری شده است. در حالی که تصفیه و مدیریت لجن یکی از مهم‌ترین، پیچیده‌ترین و هزینه‌برترین بخش‌های تصفیه‌خانه‌های فاضلاب محسوب می‌شود (Lancaster et al., 2008) و می‌تواند تا ۶۰ درصد هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و بهره‌برداری یک تصفیه‌خانه فاضلاب را به خود اختصاص دهد (Coma et al., 2013; Pilli et al., 2015).

به‌طور معمول، واحدهای مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری برای تصفیه لجن شامل تغلیظ، تثبیت و آبیگری است. دو راهبرد کلی بخش لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، تصفیه لجن با هدف تثبیت کردن و حذف بوی آن و یا با هدف تبدیل لجن به جامدات بیولوژیکی برای کاربرد در زمین طبق تعریف استاندارد EPA است. کاربرد جامدات بیولوژیکی در زمین مستلزم دستیابی به محدوده مناسب غلظت آلاینده‌ها، کاهش پاتوژن‌ها براساس کلاس A یا B به‌انضمام کاهش جذب ناقلین منطبق بر استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا است. به‌دلیل هزینه‌های بالای دستیابی به کیفیت جامدات بیولوژیکی کلاس A، در کشور ما دستیابی به استاندارد کلاس B در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب احداث شده یا در حال ساخت بیشتر مدنظر است. فرآیندهای مورد استفاده برای کاهش قابل توجه پاتوژن‌ها، هاضم هوازی با زمان ماند سلولی (SRT) برابر ۴۰ روز در دمای ۲۰ درجه، هاضم بی‌هوازی با زمان ماند سلولی ۱۵-۲۰ روز، کمپوست‌سازی، تثبیت با آهک و خشک کردن توسط هوا هستند (Turovskiy and Mathai, 2006; Tchobanoglous et al., 2014).

از طریق توسعه سیستم‌های کنترلی برای بهینه‌کردن مصرف انرژی در سیستم‌های هوادهی و پمپ‌ها، تولید بیوگاز توسط هاضم‌های بی‌هوازی و تولید همزمان حرارت و برق در محل و هم‌هم‌زمان لجن با زائدات غذایی با هدف افزایش بیوگاز هستند (Hao, 2015; Longo et al., 2016). شکل ۱ میزان انرژی مصرفی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را براساس ظرفیت سیستم و جدول ۱ میزان مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برخی کشورها را نشان می‌دهند. مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بهینه طراحی و احداث شده، ۲۰ تا ۳۰ کیلووات ساعت به‌ازای هر نفر در سال است که به‌طور متوسط ۶۴ درصد آن در واحد هوادهی استفاده می‌شود (Gandiglio et al., 2017).

براساس گزارش ارائه شده WERF^۵، انرژی موجود در فاضلابی با COD معادل ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر برابر ۱/۹۳ کیلووات ساعت در مترمکعب و میزان انرژی مورد نیاز تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ۰/۳ تا ۰/۸ کیلووات ساعت به‌ازای هر مترمکعب فاضلاب تصفیه‌شده است. لذا در صورت بازیابی کامل انرژی از فاضلاب، می‌توان علاوه بر تأمین کل انرژی مورد نیاز در واحدهای مختلف تصفیه فاضلاب، انرژی مازاد تولیدی را در اختیار شبکه سراسری برق قرار داد (Hao et al., 2015). در سال‌های اخیر، خودکفایی تأمین انرژی تصفیه‌خانه‌ها از فاضلاب، موضوع نو و پراهمیتی محسوب شده، به‌طوری‌که تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متعددی در جهان براساس این هدف، احداث یا بهینه شده‌اند. اقدامات لازم برای دستیابی به این هدف شامل بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه



شکل ۱- میزان مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب براساس ظرفیت سیستم تصفیه (Gandiglio et al., 2017)

جدول ۱- میزان مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در برخی کشورهای جهان

کشور	مصرف انرژی (kWh/m ³ /y)	مصرف انرژی (kWh/PE/y)	درصد مصرف انرژی در واحد هوادهی	مراجع
هلند	۰/۴	-	-	Hao et al. (2015)
چین	۰/۳	-	-	Hao et al. (2015)
اسپانیا	۰/۵۵	-	-	Gandiglio et al. (2017)
آلمان	۰/۷-۰/۴	۶۰-۳۵	-	Hao et al. (2015)
آلمان (در شرایط ایده‌آل-استاندارد)	-	۳۰-۲۳	۷۸/۲-۷۶/۶	Jonasson (2007)
استرالیا (متوسط)	-	۲۳	۶۹/۵	Jonasson (2007)
انگلیس (متوسط)	۰/۶	-	-	Belloir et al. (2015)
سوئد (متوسط)	-	۴۲	۴۲/۹	Jonasson (2007)

مقایسه با تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ساخته شده در جدول ۱ قابل توجه نیست، از سوی دیگر در سال‌های اخیر در کشور، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متعددی با فرآیند بخش مایع دارای تانک ته‌نشینی اولیه (تولید لجن خام) و بخش لجن با هاضم هوازی احداث شده‌اند که در این فرآیندها انرژی زیادی صرف هوادهی در بخش مایع و لجن می‌شود. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با ظرفیت ۳۵۰۰۰ تا ۸۰۰۰۰ مترمکعب در روز در استان‌های اصفهان، البرز، خراسان رضوی، مازندران و نهبوند نمونه‌ای از این تصفیه‌خانه‌ها

نکته قابل‌تأمل این‌که (Tchobanoglous et al. 2014) اشاره کردند "در سال‌های اخیر برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با دبی ۲ مترمکعب در ثانیه برای تصفیه لجن از هاضم هوازی لجن استفاده شده است". در کشور ما نیز نمونه‌های متعددی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با هاضم هوازی لجن احداث شده‌اند که با توجه به میزان بالای انرژی مصرفی به دلیل نیاز به حجم زیاد هوادهی در این روش تصفیه، این سیستم از نقطه‌نظر مصرف انرژی نزدیک به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با فرآیند EAAS عمل نموده است که در

۲- روش تحقیق

این تحقیق از نوع کاربردی است و فرآیند تصفیه‌خانه فاضلاب شرق مشهد از نظر میزان مصرف انرژی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (احجام واحدهای فرآیندی) در مقایسه با فرآیندهای پیشنهادی دیگر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۲-۱- مشخصات تصفیه‌خانه

تصفیه‌خانه فاضلاب شرق مشهد، در دو مدول و چهار خط جریان برای جمعیت ۵۰۰,۰۰۰ نفر و دبی متوسط ۸۰,۰۰۰ مترمکعب در روز در سال ۱۳۹۵ به بهره‌برداری رسید. در جدول ۲ مشخصات واحدهای فرآیندی و در شکل ۲ نقشه هوایی این تصفیه‌خانه فاضلاب نشان داده شده است. مطابق شکل، فرآیند در نظر گرفته شده برای این تصفیه‌خانه در بخش مایع MLE و در بخش لجن تغلیظ (تغلیظ ثقیل برای لجن خام و تغلیظ مکانیکی برای لجن ثانویه)، تثبیت با هاضم هوازی و آبیگری است.

جدول ۲- مشخصات واحدهای فرآیندی تصفیه‌خانه فاضلاب شرق مشهد

واحد	تعداد (ابعاد)	واحد	تعداد (ابعاد)
آشغالگیر درشت‌دانه	۱ (۱۵ cm)	ته‌نشینی ثانویه	۴ (D=۴۰ m, H=۴ m)
آشغالگیر ریزدانه	۲+۱ (۱۰ mm)	کلر زنی	۲ (L=۲۶ m, W=۱۲ m, H=۳ m)
دانه‌گیر هوادهی	۲ (L=۲۶ m, W=۵۳ m, H=۳/۵ m)	تغلیظ ثقیل	۲ (D=۹ m, H=۵/۸ m)
ته‌نشینی اولیه	۴ (D=۲۵ m, H=۳ m)	تغلیظ مکانیکی	۲+۱
تانک آنوکسیک	۴ (L=۲۳ m, W=۱۴ m, H=۶ m)	هاضم هوازی	۲ (L=۴۸ m, W=۲۰ m, H=۶ m)
تانک هوادهی	۴ (L=۵۹ m, W=۲۳ m, H=۶ m)	آبیگری مکانیکی	۴+۱



شکل ۲- نقشه هوایی تصفیه‌خانه فاضلاب شرق مشهد

دستیابی به کیفیت پساب خروجی برای تخلیه به آب‌های سطحی منطبق بر استاندارد سازمان محیط‌زیست ایران و با هدف تثبیت لجن به جامدات بیولوژیکی کلاس B برای کاربرد در زمین طراحی شده است.

۲-۲- مشخصات فاضلاب و پساب

در جدول ۳، مشخصات فاضلاب ورودی، پساب خروجی و نسبت‌های طراحی که از مطالعات مشاور طرح استخراج شده آورده شده است. لازم به ذکر است این تصفیه‌خانه با هدف

جدول ۳- مشخصات فاضلاب ورودی، پساب خروجی و نسبت‌های طراحی*

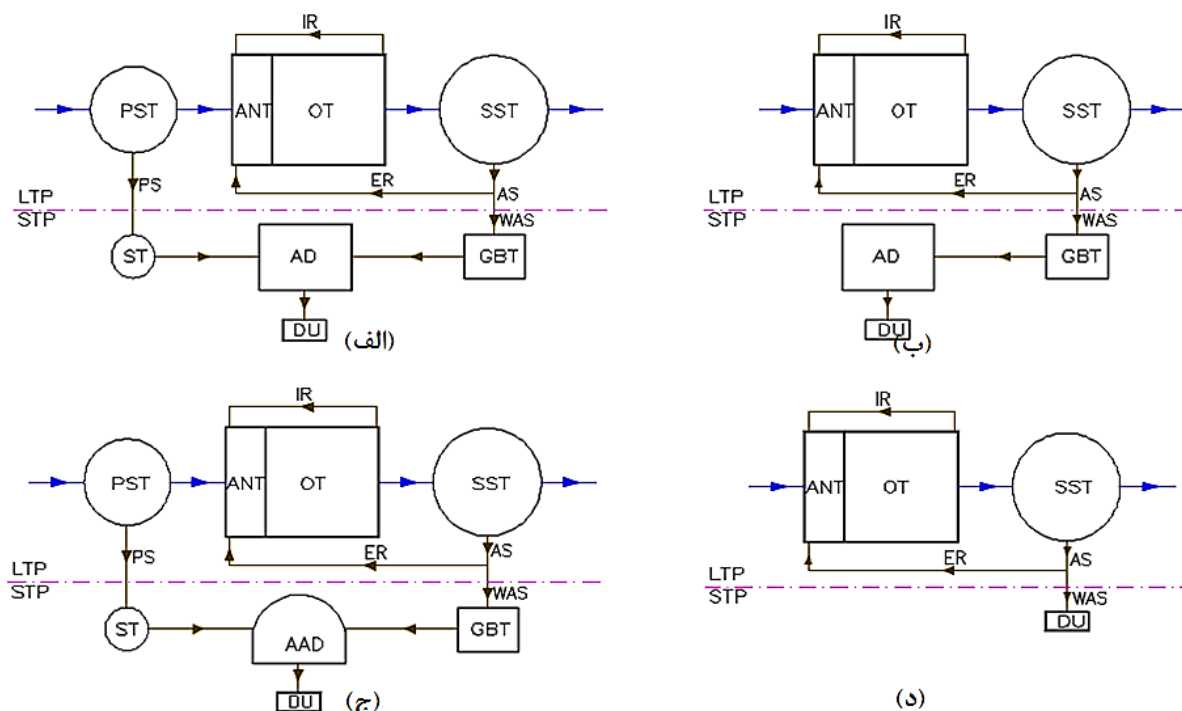
نسبت‌های طراحی		فاضلاب ورودی و پساب خروجی		
مقدار	پارامتر	پساب خروجی (میلی‌گرم در لیتر)	فاضلاب ورودی (میلی‌گرم در لیتر)	پارامتر
۱/۶	bCOD/BOD ₅	۶۰	۵۳۲	COD
۰/۸۵	VSS/TSS	۳۰	۲۶۶	BOD ₅
۰/۳	sBOD ₅ /BOD ₅	۱۶	۴۰	TN
۰/۳	sCOD/COD	۴۰	۳۲۵	TSS
۲۰ درجه سلسیوس	دما	۶	۹	TP

* مشخصات فاضلاب، پساب و نسبت‌های طراحی از مطالعات مشاور طرح استخراج شده است.

۳-۲- بررسی فرآیندهای مختلف

منطقه مورد مطالعه آورده شده است. این فرآیندها با توجه به پارامترهایی از قبیل کمیت و کیفیت فاضلاب ورودی، جمعیت تحت پوشش، میزان انرژی مصرفی، فضای مورد نیاز، سهولت بهره‌برداری و نگهداری، توجیه اقتصادی، کاربرد بودن سیستم، امکان اجرای آن در محل و نوع سیستم تصفیه موجود انتخاب شده است. مطابق شکل ۳-الف، فلودیاگرام فرآیندی تصفیه‌خانه فاضلاب مورد مطالعه، از نوع MLE با هاضم هوازی است. در این مقاله فرآیند انتخاب شده برای این تصفیه‌خانه، با ۳ جریان فرآیندی دیگر (شکل ۳-ب، فرآیند لجن فعال هوادهی گسترده با حذف ازت (BNR-EAAS) و با زمان‌های ماند سلولی ۲۰، ۲۴ و ۳۰ روز، شکل ۳-ج، فرآیند بخش مایع MLE و هاضم بی‌هوازی و شکل ۳-د، فرآیند لجن فعال هوادهی گسترده با حذف ازت و زمان ماند سلولی ۴۰ روز) مقایسه شده است.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که سن لجن یک پارامتر مهم طراحی و بهره‌برداری فرآیندهای لجن فعال بوده و با افزایش این فاکتور، جرم سلولی دفع شده از سیستم کاهش، حجم واحد هوادهی افزایش و هزینه‌های مدیریت لجن می‌تواند کاهش یابد (Turovskiy and Mathai, 2006; Tchobanoglous et al., 2014). به‌عنوان نمونه حداقل SRT برای انجام فرآیند نیتریفیکاسیون در دمای ۲۰ درجه برای غلظت‌های آمونیوم ورودی و خروجی به ترتیب ۴۵ و کمتر از ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر برحسب نیتروژن، ۴ روز است (Henze et al., 2008). طبق بررسی‌های انجام شده، زمان ماند سلولی در فرآیندهای MLE ساخته یا طراحی شده در کشور، ۷ تا ۱۰ روز در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ فلودیاگرام‌های فرآیند طرح پایه و فرآیندهای پیشنهادی برای تصفیه بخش مایع و لجن تصفیه‌خانه فاضلاب



شکل ۳- فلودیاگرام فرآیندی تصفیه بخش مایع و لجن، الف) بخش مایع MLE و بخش لجن AD؛ ب) بخش مایع BNR-EAAS و بخش لجن AD؛ ج) بخش مایع MLE و بخش لجن AD و د) بخش مایع BNR-EAAS با تثبیت لجن در بخش مایع

این تصفیه‌خانه فاضلاب احداث شده که میزان حذف TSS ، BOD_5 و COD به ترتیب ۳۳، ۵۴ و ۳۳ درصد در نظر گرفته شده است (Tchobanoglous et al., 2014; Patziger, 2016). هم‌چنین طبق طرح، غلظت لجن اولیه از ۲/۵ درصد توسط تغلیظ‌کننده ثقلی و غلظت لجن ثانویه از ۰/۸ درصد توسط تغلیظ‌کننده مکانیکی به حدود ۴ درصد در نظر گرفته شد.

در جدول‌های ۴ و ۵، به ترتیب ضرایب سینتیکی برای طراحی فرآیند در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و میزان تولید لجن اولیه و ثانویه به تفکیک هر چهار فلودیاگرام در SRT‌های مختلف نشان داده شده است (Tchobanoglous et al., 2014). مطابق جدول‌های ۲ و ۴ واحد تانک ته‌نشینی اولیه به قطر ۲۵ متر در

جدول ۴- ضرایب سینتیکی مورد استفاده در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (Tchobanoglous et al., 2014)

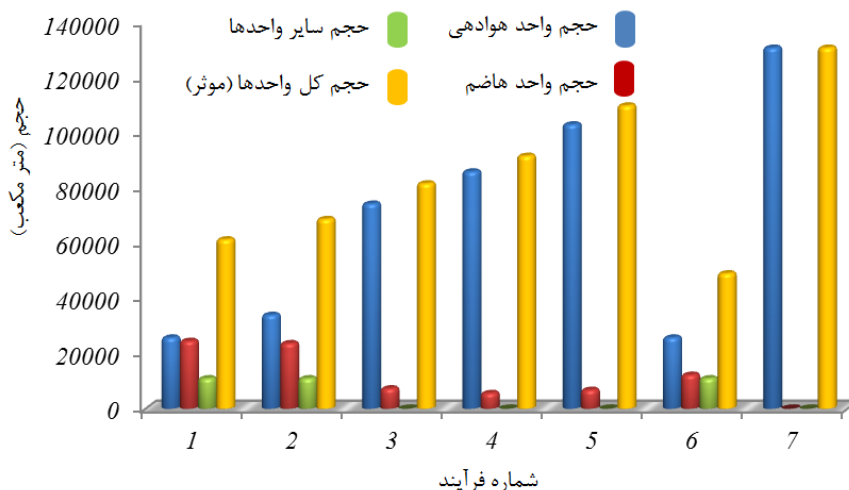
پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار
μ_{max}	gVSS/gVSS.d	۶	$\mu_{max,AOB}$	gVSS/gVSS.d	۰/۹
b_H	gVSS/gVSS.d	۰/۱۲	b_{AOB}	gVSS/gVSS.d	۰/۱۷
Y_H	gVSS/gCOD	۰/۴۵	Y_n	gVSS/gNOx	۰/۱۵
f_d	unitless	۰/۱۵			

جدول ۵- میزان تولید لجن اولیه و ثانویه قبل و پس از سیستم تغلیظ (مترمکعب در روز)

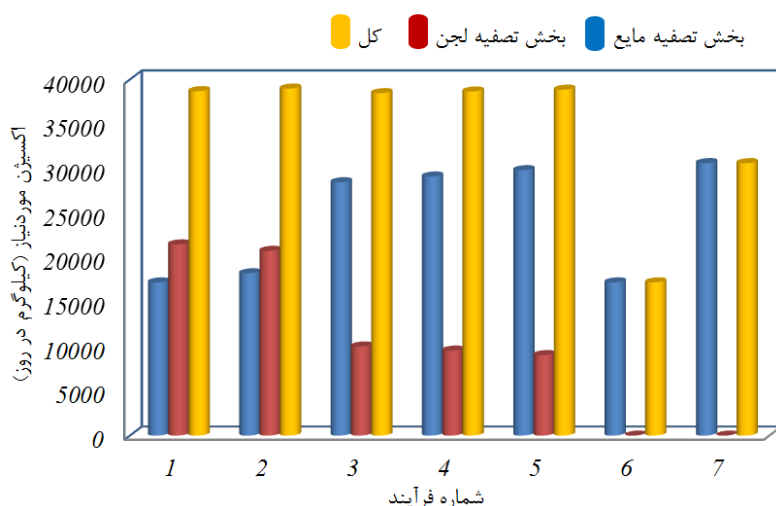
شماره فرآیند	زمان ماند سلولی (روز)	لجن اولیه	لجن ثانویه	لجن اولیه پس از تغلیظ	لجن ثانویه پس از تغلیظ	لجن کل پس از تغلیظ
۱ الف	۷	۵۴۵	۱۳۶۶	۳۴۰	۲۷۳	۶۱۳
۲ الف	۱۰	۵۴۵	۱۲۶۲	۳۴۰	۲۵۲	۵۹۲
۳ ب	۲۰	۰	۱۸۲۸	۰	۳۶۷	۳۶۷
۴ ب	۲۴	۰	۱۷۷۲	۰	۳۵۴	۳۵۴
۵ ب	۳۰	۰	۱۷۰۰	۰	۳۴۱	۳۴۱
۶ ج	۷	۵۴۵	۱۳۶۶	۳۴۰	۲۷۳	۶۱۳
۷ د	۴۰	۰	۱۶۱۸	۰	۳۲۳	۳۲۳

شکل ۲ میزان اکسیژن مورد نیاز بخش مایع و لجن را به صورت مجزا نشان می‌دهد. لازم به توضیح است طراحی فرآیندهای پیشنهادی براساس فرمول‌ها و معیارهای طراحی مندرج در کتاب مهندسی فاضلاب انتشارات متکاف و ادی در سال ۲۰۱۴ انجام شده است (Tchobanoglous et al., 2014).

در شکل ۱، میزان حجم‌های محاسبه شده برای فلودیاگرام‌های مختلف شامل حجم کل واحدهای مؤثر بدون در نظر گرفتن واحدهای مشابه در هر چهار فرآیند مانند واحدهای تصفیه فیزیکی، تانک آنوکسیک و هم‌چنین احجام به تفکیک، شامل حجم تانک هوادهی، هاضم و سایر واحدهای مؤثر از جمله تانک ته‌نشینی اولیه و تغلیظ‌کننده آورده شده است. هم‌چنین



شکل ۱- حجم‌های فرآیندی تأثیرگذار در فلودیاگرام‌های مختلف



شکل ۲- میزان اکسیژن مورد نیاز در فلودیاگرام‌های مختلف

مورد نیاز برای BOD_5 موجود در لجن اولیه برابر $1/9$ کیلوگرم به‌ازای هر کیلوگرم BOD_5 و کارایی انتقال اکسیژن معادل 10 درصد در شرایط کاری در نظر گرفته شد. لذا در مقایسه با لجن ثانویه، هضم هوازی لجن اولیه به مقدار اکسیژن بیشتر و زمان ماند طولانی‌تری نیاز دارد، طوری‌که اکسیژن مورد نیاز مخلوط لجن اولیه و ثانویه در فرآیند هضم 5 تا 10 برابر بیش از مقدار مورد نیاز برای لجن دفعی به تنهایی است (Tchobanoglous et al., 2014; Turovskiy and Mathai, 2006).

در محاسبه اکسیژن مورد نیاز بخش مایع، میزان مصرف اکسیژن مرحله نیتروبیفیکاسیون و بازیافت اکسیژن تانک آنوکسیک در مرحله دنیتروبیفیکاسیون در نظر گرفته شده است و میزان هوای مورد نیاز با توجه به شرایط منطقه و براساس ضرایب جدول ۶ و با احتساب ضریب اطمینان $1/5$ محاسبه شده است. همچنین، اکسیژن مورد نیاز بخش لجن در هاضم هوازی شامل دو بخش، اکسیژن بافت سلولی برای دستیابی به مقررات کاهش پاتوژن‌ها برابر $2/3$ کیلوگرم به‌ازای هر کیلوگرم VSS ورودی و اکسیژن

جدول ۶- ضرایب استفاده شده در محاسبه میزان هوای مورد نیاز (Tchobanoglous et al., 2014)

پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار
P_d	kN/m^2	$143/49$	α	unitless	$0/6$
O_2	$(kg O_2)/(m^3 Air)$	$0/241$	β	unitless	$0/95$
f	$gVSS/gbCOD$	$0/9$	C_L	mg/L	2
Oxygen Transfer	$kg O_2/m^3 Air.m$	$0/016$	$C_{s,T,H}$	mg/L	$9/2$

۴- بررسی و بحث

۴-۱- مقایسه حجم واحدهای فرآیندی در گزینه‌های مختلف

با توجه به شکل ۱، کمترین حجم واحدهای مؤثر (مجموع حجم واحدهای تهنشینی اولیه و هوادهی بخش مایع، هاضم هوازی، تغلیظ‌کننده بخش لجن و سایر واحدهای ارتباطی) مربوط به فرآیند MLE به‌همراه هاضم بی‌هوازی فلودیاگرام (۳-ج) است که این حجم نسبت به فرآیند پایه استفاده شده در این تصفیه‌خانه فلودیاگرام (۳-الف) حدود 30 درصد کمتر است. همچنین، حجم کل واحدهای مؤثر در فرآیند MLE به‌همراه هاضم هوازی

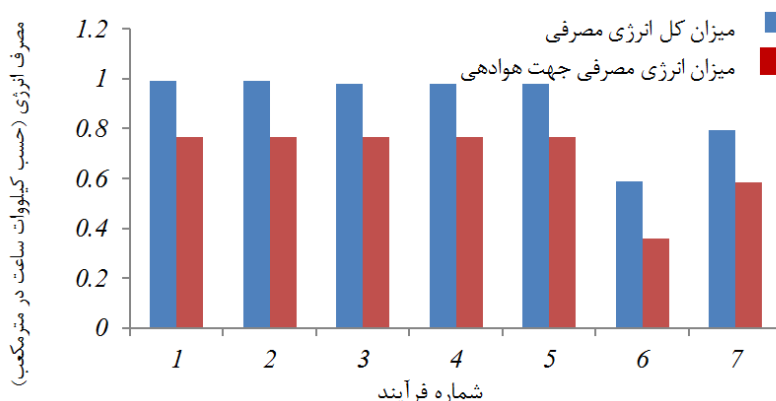
در این مقاله محاسبات میزان انرژی مصرفی براساس محاسبات مشاور طرح انجام شده است و برای مقایسه بهتر از مشخصات بلوئر استفاده شده در این تصفیه‌خانه (ظرفیت هر بلوئر 3800 مترمکعب در روز، فشار 650 میلی‌بار و توان 150 کیلووات) استفاده شد. جدول ۷، تعداد کل بلوئرها را برای هوادهی به‌صورت مجزا در بخش مایع و لجن و همچنین میزان توان مصرفی و انرژی تولیدی در تصفیه‌خانه را برای فلودیاگرام‌های شکل ۳ نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۳، میزان کل انرژی مصرفی تصفیه‌خانه و میزان انرژی مصرف شده برای هوادهی بخش مایع و لجن برای فلودیاگرام‌های مختلف تصفیه برحسب کیلووات ساعت در مترمکعب نشان داده شده است.

واحد تغلیظ‌کننده برای لجن خام اولیه و کاهش عملیات لوله‌گذاری بین واحدهای فرآیندی، مشکلات کمتر در بخش تصفیه لجن و عدم تولید بوی نامطلوب لجن خام، پیچیدگی‌های بهره‌برداری و عملیات ساختمانی واحدهای متعدد کاهش چشمگیری خواهد یافت.

فلویدیاگرام (شکل ۳-الف)، ۲۵ درصد نسبت به سیستم BNR-EAAS به‌همراه هاضم هوازی فلویدیاگرام (شکل ۳-ب) با SRT برابر ۲۰ روز، کمتر است، که علی‌رغم کاهش حجم در فرآیند MLE، با توجه به تعداد کمتر واحدهای فرآیندی در سیستم BNR-EAAS (شکل ۳-ب) و نداشتن واحدهای ته‌نشینی اولیه،

جدول ۷- توان مصرفی در فرآیندهای مختلف بر حسب کیلووات

انرژی تولیدی در تصفیه‌خانه (کیلووات)	کل توان مصرفی تصفیه‌خانه (کیلووات)	توان مصرفی در سایر واحدها (کیلووات)				توان مصرفی جهت هوادهی (کیلووات)	تعداد کل بلوئرها (لجن + مایع)	زمان ماند سلولی (روز)	شماره فرآیند	
		ساختمان‌های جانبی، روشنایی، کلرزنی و غیره	تغلیظ و آبرگیری لجن	دانه‌گیری و آشغالگیری	کلیه پمپ‌ها				الف	ب
-	۳۳۰۵	۲۵۰	۴۵	۴۰	۴۲۰	۲۵۵۰	۱۷ (۸+۹)	۷	۱	الف
-	۳۳۰۵	۲۵۰	۴۵	۴۰	۴۲۰	۲۵۵۰	۱۷ (۸+۹)	۱۰	۲	الف
-	۳۲۶۰	۲۵۰	۳۰	۴۰	۳۹۰	۲۵۵۰	۱۷ (۱۳+۴)	۲۰	۳	ب
-	۳۲۶۰	۲۵۰	۳۰	۴۰	۳۹۰	۲۵۵۰	۱۷ (۱۳+۴)	۲۴	۴	ب
-	۳۲۶۰	۲۵۰	۳۰	۴۰	۳۹۰	۲۵۵۰	۱۷ (۱۳+۴)	۳۰	۵	ب
۹۱۵	۱۹۵۵	۲۵۰	۴۵	۴۰	۴۲۰	۱۲۰۰	۸ (۸+۰)	۷	۶	ج
-	۲۶۵۰	۲۵۰	۲۰	۴۰	۳۹۰	۱۹۵۰	۱۳ (۱۳+۰)	۴۰	۷	د



شکل ۳- میزان انرژی مصرفی در فلویدیاگرام‌های مختلف

فعال مانند MLE، مصرف انرژی معادل روش BNR-EAAS که به‌طور متعارف برای اجتماعات کوچک استفاده می‌شود، خواهد بود (Qasim and Zhu, 2018).

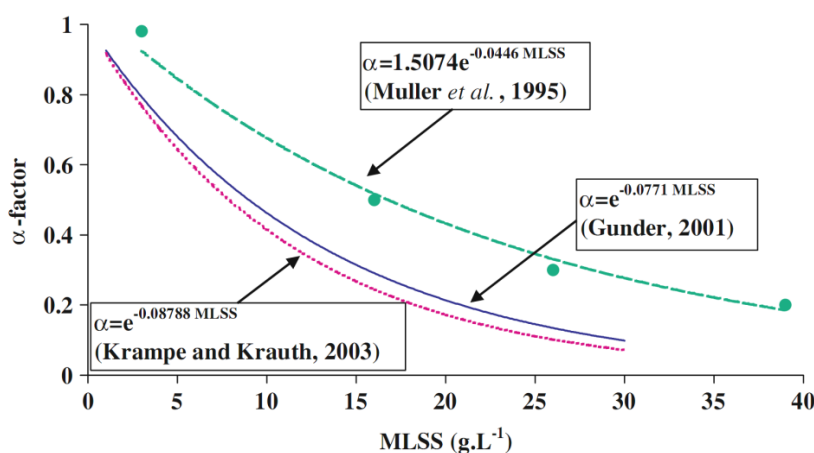
با توجه به نتایج جدول ۷، در فرآیند (الف) حدود ۴۰ درصد انرژی در بخش لجن مصرف شده است که در صورت تغییر سیستم هاضم از نوع هوازی به بی‌هوازی (شکل ۳-ج)، انرژی مصرفی می‌تواند بیش از ۴۰ درصد کاهش یافته و به‌طور قطع در شرایط تولید برق و گرما از بیوگاز تولیدی (سیستم CHP)، مصرف انرژی کاهش بیشتری خواهد یافت و می‌توان از بخشی از انرژی تولید شده در هاضم‌ها برای تأمین برق تصفیه‌خانه استفاده نمود. هم‌چنین، میزان متوسط متان تولیدی در لجن اولیه و ثانویه

۲-۴- بررسی میزان مصرف انرژی در گزینه‌های مختلف

مطابق شکل ۳، میزان اکسیژن موردنیاز برای هوادهی بخش‌های مایع و لجن، در فلویدیاگرام‌های الف و ب با SRTهای مختلف، نزدیک (با اختلاف کمتر از ۲ درصد) به هم بوده و انرژی مصرفی، ۰/۹۸ تا ۱ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب فاضلاب (۶۱ کیلووات ساعت به ازای هر نفر در سال) محاسبه شد که از این میزان انرژی مصرفی، بیش از ۷۵ درصد صرف هوادهی بخش مایع و لجن می‌شود. لذا میزان هوادهی و به تبع آن انرژی مصرفی هر دو فلویدیاگرام بسیار نزدیک بوده و تنها این میزان انرژی بین واحدهای هوادهی در بخش مایع و هاضم هوازی تقسیم می‌شود. در نتیجه در صورت استفاده از هاضم هوازی در فرآیندهای لجن

تصفیه لجن می‌تواند به‌طور کامل حذف شود. یکی از دلایل کاهش میزان هوادهی و به تبع آن کاهش انرژی مصرفی این فرآیند نسبت به سایر فرآیندها، افزایش کارایی انتقال اکسیژن در واحد هوادهی بخش مایع نسبت به هضم هوازی لجن تغلیظ‌شده است. به‌طور نمونه طبق شکل ۴، میزان α در صورت تغییر غلظت لجن از ۴ به ۳۰ گرم در لیتر، بیش از ۳ برابر کاهش یافته و یا در صورت استفاده از سیستم دیفیوژری حباب درشت در هاضم هوازی، کارایی انتقال اکسیژن نسبت به دیفیوژرهای حباب ریز کاهش محسوسی می‌یابد (Ruffino et al., 2019).

به‌ترتیب برابر ۰/۲۸۰ و ۰/۱ کیلوگرم به‌ازای هر کیلوگرم VSS اضافه‌شده است. لذا در صورت استفاده از فرآیندهایی با واحد ته‌نشینی اولیه (تولید لجن خام) استفاده از فرآیند هاضم بی‌هوازی لجن، مزایای زیادی به‌همراه دارد (Ruffino et al., 2019; Borzooei et al., 2019) و در صورت استفاده از هاضم هوازی، علاوه‌بر عدم استفاده از مزیت فوق، انرژی زیادی در بخش لجن صرف هوادهی می‌شود. هم‌چنین، در صورت تثبیت لجن در قسمت مایع (شکل ۳-د)، حجم واحد هوادهی با SRT برابر ۴۰ روز، ۱۳۰۰۰۰ مترمکعب می‌شود که حجم مؤثر این فرآیند، ۹۰ درصد بیشتر از فلودیگرام الف است، اما در این صورت فرآیند



نمودار ۴- میزان α در غلظت‌های مختلف لجن در تحقیقات مختلف

CHP استفاده نمود. هم‌چنین در صورت افزایش سن لجن به ۴۰ روز مطابق شکل ۳-د و تثبیت لجن در بخش مایع، میزان انرژی مصرفی $0/79 \text{ kWh/m}^3$ خواهد شد که نسبت به سیستم تصفیه موجود این تصفیه‌خانه، میزان انرژی مصرفی ۲۱ درصد کاهش می‌یابد. علاوه‌بر آن، به‌دلیل عدم وجود لجن خام اولیه و تأسیسات هضم لجن، مشکلات بهره‌برداری از این سیستم نسبت به سیستم تصفیه موجود کمتر خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری

تصفیه فاضلاب شامل دو بخش تصفیه مایع و لجن است. تصفیه و مدیریت لجن یکی از پیچیده‌ترین و هزینه‌برترین بخش‌های تصفیه‌خانه است و می‌تواند تا ۶۰ درصد هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و بهره‌برداری یک تصفیه‌خانه فاضلاب را به‌خود اختصاص دهد. با تحقیق انجام شده در تصفیه‌خانه فاضلاب مورد مطالعه می‌توان نتیجه گرفت:

در جدول ۸، میزان کل انرژی مصرفی و توزیع آن در برخی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب احداث شده در جهان و مقایسه آن با سیستم‌های تصفیه مورد مطالعه و پیشنهادی آورده شده است. همان‌گونه که از نمودار ۲ مشاهده می‌شود مصرف انرژی دو فرآیند پیشنهادی فلودیگرام الف و ب (حدود 1 kWh/m^3) در مقایسه با تصفیه‌خانه‌های جدول ۸، ۲ تا ۳ برابر بوده و در صورت تغییر سیستم تصفیه مطابق شکل ۳-ج و احداث هاضم‌های بی‌هوازی میزان انرژی مصرفی به $0/58 \text{ kWh/m}^3$ کاهش خواهد یافت. تحقیق انجام شده توسط Yan He et al. (2019) و Gu et al. (2017)، بر روی ۵۳۴ تصفیه‌خانه فاضلاب با فرآیندهای A_2O ، AO و MLE نشان داد که میزان انرژی مصرفی در این تصفیه‌خانه‌ها در محدوده $0/267 \text{ kWh/m}^3$ تا $0/33$ است. لذا حتی در صورت تغییر سیستم از هاضم هوازی به بی‌هوازی در تصفیه‌خانه فاضلاب شرق مشهد، انرژی مصرفی این تصفیه‌خانه ($0/58 \text{ kWh/m}^3$) حدود ۲ برابر بیشتر از تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه خواهد شد. بنابراین لازم است از سایر روش‌های کاهش مصرف انرژی مانند تولید برق از گاز متان و بازیابی بیشتر از ۴۵ درصد انرژی توسط سیستم

جدول ۸- انرژی مصرفی کل و توزیع انرژی در بخش‌های مختلف تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و تصفیه‌خانه مورد مطالعه

مراجع	توزیع انرژی مصرفی (درصد)			مصرف انرژی (kWh/m^3)	فرآیند تصفیه	مشخصات و موقعیت تصفیه‌خانه فاضلاب
	سایر واحدها	لجن	هوادهی			
Gans et al. (2007)	۳۸	۵	۵۷	۰/۲۶	لجن فعال متعارف با هاضم بی‌هوایی	تصفیه‌خانه فاضلاب پیشرفته چین با جمعیت ۲۴۰۰۰۰۰ نفر (Beijing)
Panepinto et al. (2016)	۲۰	۲۹	۵۱	۰/۳	لجن فعال با حذف نیتروژن و فسفر با هاضم بی‌هوایی	تصفیه‌خانه فاضلاب پیشرفته تورین ایتالیا با جمعیت ۲۷۰۰۰۰۰ نفر
Jonasson (2007)	۳۰	۱۳	۵۷	۰/۳۲	لجن فعال دو مرحله‌ای با هاضم بی‌هوایی	تصفیه‌خانه فاضلاب پیشرفته استرالیا با جمعیت ۲۵۰۰۰۰ نفر (Strass)
Yan et al. (2019)	-	-	-	کمتر از ۰/۳۳	$\text{A}_2\text{O-AO}$ با هاضم بی‌هوایی	۴۵۲ تصفیه‌خانه فاضلاب در چین با ظرفیت بیش از ۵۰۰۰۰ مترمکعب در روز
Hao et al. (2015)	۳۸	۱۴	۴۸	۰/۴۸	لجن فعال با هاضم بی‌هوایی	تصفیه‌خانه فاضلاب سوئد با جمعیت ۵۰۰۰۰۰ نفر
Maktabifard et al. (2018)	۱۸	۷	۷۷	۰/۳	لجن فعال با هاضم بی‌هوایی	تصفیه‌خانه فاضلاب تبریز (بعد از ارتقا) با دبی ۱/۵ مترمکعب در ثانیه
این مطالعه (شکل ۳-الف)- SRT برابر ۷ و ۱۰ روز	۲۰	۴۲	۳۸	۱	MLE با هاضم هوایی	تصفیه‌خانه مورد مطالعه با جمعیت ۵۰۰۰۰۰ نفر
این مطالعه (شکل ۳-ب)- SRT برابر ۲۰، ۲۴ و ۳۰ روز	۲۱	۱۹	۶۰	۰/۹۸	BNR-EAAS با هاضم هوایی	تصفیه‌خانه مورد مطالعه با جمعیت ۵۰۰۰۰۰ نفر
این مطالعه (شکل ۳-ج)- SRT برابر ۷ روز	۳۶	۳	۶۱	۰/۵۸	MLE با هاضم بی‌هوایی	تصفیه‌خانه مورد مطالعه با جمعیت ۵۰۰۰۰۰ نفر
این مطالعه (شکل ۳-د)- SRT برابر ۴۰ روز	۲۵/۳	۰/۷	۷۴	۰/۷۹	BNR-EAAS	تصفیه‌خانه مورد مطالعه با جمعیت ۵۰۰۰۰۰ نفر

• در صورت استفاده از هاضم هوایی لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با واحد ته‌نشینی اولیه (تولید لجن خام)، میزان مصرف انرژی نزدیک به سیستم‌های BNR-EAAS یا روش‌های مشابه دیگر، که به‌طور متعارف برای اجتماعات کوچک استفاده می‌گردند، می‌باشد و در عمل نمی‌توان از مزیت تولید انرژی لجن خام استفاده کرد؛

• حجم کل واحدهای مؤثر در فرآیند MLE با هاضم بی‌هوایی نسبت به فرآیند موجود در تصفیه‌خانه فاضلاب شرق مشهد، حدود ۳۰ درصد کمتر است. هم‌چنین، علیرغم افزایش حجم مؤثر ۲۵ درصدی سیستم BNR-EAAS با هاضم هوایی در مقایسه با فرآیند پایه، پیچیدگی‌های مرحله ساخت و بهره‌برداری هر دو بخش مایع و لجن در سیستم BNR-EAAS به دلیل تعداد کمتر واحدهای فرآیندی، کاهش تجهیزات الکترومکانیکال و هم‌چنین عدم تولید لجن اولیه، کمتر خواهد بود؛

• با توجه به مزایای متعدد زیست‌محیطی و اقتصادی استفاده از

• میزان انرژی مصرفی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با واحد ته‌نشینی اولیه (تولید لجن خام) و با هدف دستیابی به جامدات بیولوژیکی کلاس B، در صورت استفاده از هاضم هوایی به‌جای بی‌هوایی حدود ۲ برابر است و در صورت استفاده از هضم هوایی لجن، عملاً نمی‌توان از مزیت تولید متان به میزان سه برابر لجن اولیه نسبت به لجن ثانویه و به تبع آن تولید برق و حرارت برای کاهش قابل توجه انرژی استفاده نمود؛

• نتایج این تحقیق نشان داد میزان انرژی مصرفی تصفیه‌خانه فاضلاب شرق مشهد با فرآیند MLE و هاضم هوایی (kWh/m^3) (۱)، حدود ۳ برابر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب احداث شده در سایر نقاط جهان با فرآیند (MLE یا A_2O) و هاضم بی‌هوایی همراه با سیستم CHP (kWh/m^3) ۰/۲۶۷ تا ۰/۳۳) است. لذا با انتخاب سیستم مناسب تصفیه لجن به‌خصوص برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با جمعیت بالا، می‌توان بیش از ۶۰ درصد در میزان انرژی مصرفی و به تبع آن هزینه‌های بهره‌برداری صرفه‌جویی کرد؛

- challenges”, *Energy Procedia*, 105(1), 3741-3751.
- He, Y., Zhu, Y., Chen, J., Huang, M., Wang, P., Wang, G., Zou, W., and Zhou, G., (2019), “Assessment of energy consumption of municipal wastewater treatment plants in China”, *Journal of Cleaner Production*, 228, 399-404.
- Henze, M., Loosdrecht, M.C.M., Kkama, G., and Brdjanovic, D., (2008), *Biological wastewater treatment, principle, modeling and design*, IWA Publishing.
- Hao, X., Liu, R., and Huang, X., (2015), “Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China”, *Water Research*, 87, 424-431.
- Hao, X., Wang, X., Liu, R., Li, S., van Loosdrecht, M.C.M., and Jiang, H., (2019), “Environmental impacts of resource recovery from wastewater treatment plants”, *Water Research*, 160, 268-277.
- Jiang, S., Wang, J., Zhao, Y., et al., (2016), “Residential water and energy nexus for conservation and management: a case study of Tianjin”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(35), 15919-15929.
- Jonasson, M., (2007), “Energy benchmark for wastewater treatment processes-A comparison between Sweden and Austria”, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Sweden.
- Longo, S., d’Antoni, B.M., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F., and et al., (2016), “Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement”, *Applied Energy*, 179(1), 1251-1268.
- Maktabifard, M., Zaborowska, E., and Makinia, J., (2018), “Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants through energy savings and enhancing renewable energy production”, *Reviews Environmental Science and Biotechnology*, 17, 655-689.
- Gans, N., Mobini, S., Zhang, X.N., (2007), “Appendix E. Mass and energy balances at the Gaobeidian wastewater treatment plant in Beijing, China”, pp 203-209.
- Pilli, S., More, T., Yan, S., Dayal Tyagi, R., and Surampalli, R.Y., (2015), “Anaerobic digestion of thermal pre-treated sludge at different solids concentrations-computation of mass-energy balance and greenhouse gas emissions”, *Journal of Environmental Management*, 157, 250-261.
- Panepinto, D., Fiore, S., Zappone, M., Genon, G., and Meucci, L., (2016), “Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy”, *Applied Energy*, 161, 404-411.
- Patziger, M., Günthert, F.W., Jardin, N., Kainz, H., and Londong, J., (2016), “On the design and operation of primary settling tanks in state of the art wastewater treatment and water resources recovery”, *Water Science & Technology*, IWA Publishing, 74(9), 2060-2067.
- Ruffino, B., Cerutti, A., Campo, G., Scibilia, G., Lorenzi, E., and Zanetti, M.C., (2019), “Improvement of energy recovery from the digestion of waste activated sludge”, *Energy Procedia*, 105(1), 3741-3751.
- فرآیندهای با انرژی مصرفی کم در تصفیه فاضلاب و از طرفی احداث یا بهینه‌سازی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در جهان با هدف خودکفایی در تأمین انرژی از فاضلاب ورودی، ضروری است در انتخاب فلودیاگرام تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در دست مطالعه با جمعیت‌های بالا، بازبینی شود و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب احداث شده با فلودیاگرام‌های مشابه تصفیه‌خانه فاضلاب مورد مطالعه (شکل ۳-الف) بهینه‌سازی شود. همچنین، حتی‌الامکان در صورت احداث تانک‌های ته‌نشینی اولیه، از هاضم بی‌هوازی به‌منظور تصفیه لجن، با هدف کاهش مصرف انرژی و در شرایط بهینه و کاهش بیشتر انرژی از سیستم CHP برای بازیابی انرژی استفاده شود.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Modified Ludzack-Ettinger (MLE)
- 2- Extended Aeration Activated Sludge (EAAS)
- 3- Advanced Sequence Batch Reactor (ASBR)
- 4- Solid Retention Time (SRT)
- 5- Water Environment Research Foundation (WERF)
- 6- Aerobic Digester (AD)
- 7- Combined Heat and Power (CHP)

۷- مراجع

- Awe, O.W., Liu, R., and Zhao, Y., (2016), “Analysis of energy consumption and saving in wastewater treatment plant: Case study from Ireland”, *Journal of Water Sustainability*, 6(2), 63-76.
- Belloir, C., Stanford, C., and Soares, A., (2015), “Energy benchmarking in wastewater treatment plants: The importance of site operation and layout”, *Environmental Technology*, 36(2), 260-269.
- Borzooei, S., Giuseppe, C., Cerutti, A., Lorenza, M., Panepinto, D., and Ravina, M., (2019), “Optimization of the wastewater treatment plant: From energy saving to environmental impact mitigation”, *Science of the Total Environment*, 691, 1182-1189.
- Chen, S., and Chen, B., (2016), “Urban energy-water nexus: A network perspective”, *Applied Energy*, 184, 905-914.
- Coma, M., Rovira, S., Canals, J., and Colprim, J., (2013), “Minimization of sludge production by a side-stream reactor under anoxic conditions in a pilot plant”, *Bioresource Technology*, 129, 229-235.
- Gandiglio, M., Lanzini, A., Soto1, A., Leone1, P., and Santarelli, M., (2017), “Enhancing the energy efficiency of wastewater treatment plants through co-digestion and fuel cell systems”, *Frontiers in Environmental Science*, 5, 1-21.
- Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Wang, X., Jiang, W., and Li, F., (2017), “Energy self-sufficient wastewater treatment plants: Feasibilities and

- sludge (WAS) through intermediate treatments: The effect of the hydraulic retention time (HRT) of the first-stage digestion”, *Applied Energy*, 240, 191-204.
- Shen, Y., Linville, J.L., Urgan-Demirtas, M., Mintz, M.M., and Snyder, S.W., (2015), “An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 346-362.
- Qasim, S.R., and Guang, Zhu., (2018), *Wastewater treatment and reuse theory and design examples*, Taylor & Francis Group.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H.D., Tsuchihashi, R., and Burton, F., (2014), *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*, 5th Edition, McGraw Hill Education, Metcalf & Eddy/AECOM, New York.
- Timothy, E.S., Andre, M.C., and Richard, L.S., (2017), “Municipal wastewater sludge as a sustainable bioresource in the United States”, *Journal of Environmental Management*, 197, 673-680.
- Turovskiy, I.S., and Mathai, P.K., (2006), *Wastewater sludge processing*, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.
- Von Sperling, M., (2007), *Wastewater characteristics, treatment and disposal*, Biological Wastewater Treatment Series, Volume 1, IWA Publishing.
- Walter, Z.T., and Mika, S., (2018), *Sustainable Environmental Engineering*, Wiley, <http://www.chemeng.lth.se/exjobb/E458.pdf>.
- Water Environment Research Foundation (WERF), (2016), *Energy Production and Efficiency Fact Sheet*. http://www.werf.org/c/KnowledgeAreas/Energy/LatestNews/2016/Energy_Production_and_Efficiency_FactSheet_2016.aspx.
- Xu, J., Li, Y., and Wang, H., (2017), “Exploring the feasibility of energy self-sufficient wastewater treatment plants: a case study in eastern China”, *Energy Procedia*, 142, 3055-3061.
- Xu, C., and Lancaster, J., (2008), “Conversion of secondary pulp/paper sludge powder to liquid oil products for energy recovery by direct liquefaction in hot compressed water”, *Water Research*, 42(67), 1571-1582.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.