

## اهمیت انتخاب فرآیند تصفیه بخش لجن در کاهش مصرف انرژی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

شیمای مردانی<sup>۱\*</sup>، وحید آقابالائی<sup>۲</sup>، مهلا تابش‌نیا<sup>۲</sup>

<sup>۱\*</sup> دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست- مهندسی آب و فاضلاب، دانشکده محیط زیست- دانشکده‌های پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست- مهندسی آب و فاضلاب، دانشکده محیط زیست- دانشکده‌های پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\*ایمیل نویسنده مسئول: mardani.sh@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۲۴

### چکیده

پیوند آب و انرژی یکی از عنصرهای اصلی توسعه پایدار جوامع انسانی محسوب شده و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نمونه‌ای از تعامل و تاثیر متقابل این پیوند می‌باشند. تصفیه فاضلاب شامل دو بخش تصفیه مایع و لجن است. 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 به خود اختصاص دهد. با توجه به اهمیت کاهش مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از نظر محیط زیستی و اقتصادی، در سال‌های اخیر تحقیقات و تلاش‌های زیادی در زمینه خودکفایی تامین انرژی از فاضلاب ورودی انجام شده و براساس این هدف تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متعددی در جهان احداث یا بهینه‌سازی شده‌اند. این در حالی است که در سال‌های اخیر در کشور، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متعددی با ظرفیت بیش از ۲۰۰۰۰ مترمکعب در روز با فرآیند هاضم هوازی لجن احداث و یا در حال ساخت می‌باشند که انرژی بسیار بالاتری نسبت به تصفیه‌خانه‌های مشابه مصرف می‌کنند. در این مقاله فرآیند مورد استفاده در برخی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به روش MLE همراه با هاضم هوازی در مقایسه با هاضم بی‌هوازی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد نوع و انتخاب فرآیند مناسب در بخش لجن در کاهش میزان انرژی مصرفی بسیار اهمیت دارد.

### واژه‌های کلیدی:

"بازیابی منابع آبی و انرژی"، "تصفیه‌خانه‌های فاضلاب"، "خودکفایی انرژی مصرفی"، "سیستم تصفیه لجن"

## The importance of selecting sludge treatment process in reducing the energy consumption of wastewater treatment plants

Shima Mardani<sup>1\*</sup>, Vahid Aghabalaei<sup>2</sup>, Mahla Tabeshnia<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> PhD student, school of Environment, college of engineering, university of Tehran, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> PhD student, school of Environment, college of engineering, university of Tehran, Tehran, Iran.

\*Email address: mardani.sh@ut.ac.ir

### Abstract

The link between water and energy is one of the key elements for the sustainable development of human societies and wastewater treatment plants are an example of the interaction of this link. Generally, wastewater treatment consists of two parts, liquid, and sludge treatment and one of most complications and costly parts of treatment plants belongs to management and treatment of sludge that up to 60% of costs of capital and operation costs of each wastewater treatment plants can allocate to that. Considering the importance of reducing energy consumption in wastewater treatment plants as an environmental and economic point of view, some attempts and investigations have done to construct and modify wastewater plants worldwide in order to the self-sufficiency of energy supply from influent recently year. Also, energy recovery and sludge management behind in large urban treatment plants have become more important in small and medium scale treatment units in the last decades while the variety of wastewater treatment plants have constructed with more than 20000 m<sup>3</sup>/d in capacity with along aerobic sludge digestion process in which energy has consumed more than same units in these years in Iran. This article analyses a process that is used in a wastewater treatment plant in Iran that its capacity is 80000m<sup>3</sup>/d and equipped by the MLE process and aerobic sludge digestion compare with anaerobic sludge digestion. Findings reveal the importance of choosing suitable sludge treatment process in the recovery and reduction of consumption energy.

### Key words

" water and energy recovery ", " wastewater treatment plants", " self-sufficiency of energy consumption ", "sludge treatment system "

## ۱- مقدمه

شبکه سراسری برق قرار داد (Hao et al., 2015). در سال‌های اخیر، خودکفایی تامین انرژی تصفیه‌خانه‌ها از فاضلاب، موضوع نو و پراهمیتی محسوب شده، به طوری که تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متعددی در جهان براساس این هدف، احداث یا بهینه شده‌اند. اقدامات لازم برای دستیابی به این هدف شامل بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه از طریق توسعه سیستم‌های کنترلی جهت بهینه کردن مصرف انرژی در سیستم‌های هوادهی و پمپ‌ها، تولید بیوگاز توسط هاضم‌های بی‌هوازی و تولید همزمان حرارت و برق در محل و هضم همزمان لجن با زائدات غذایی با هدف افزایش بیوگاز می‌باشند (Longo et al., 2016; Hao et al., 2015). مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بهینه طراحی و احداث شده، ۲۰ تا ۳۰ کیلووات ساعت به ازای هر نفر در سال می‌باشد که به طور متوسط ۶۴ درصد آن در واحد هوادهی استفاده می‌شود (Gandiglio et al., 2017). نکته قابل تامل اینکه Tchobanoglous و همکاران در سال ۲۰۱۴ اشاره کردند "در سال‌های اخیر برای تصفیه خانه‌های 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 شده است که با توجه به میزان بالای انرژی مصرفی به دلیل نیاز به حجم زیاد هوادهی در این روش تصفیه، این سیستم از نقطه نظر مصرف انرژی نزدیک به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با فرآیند EAAS عمل نموده و در مقایسه با تصفیه‌خانه‌های ساخته شده در جدول ۱ قابل توجه نمی‌باشند، این در حالی است که در ده سال گذشته در جهان، بازیابی انرژی و مدیریت لجن علاوه بر تصفیه‌خانه‌های بزرگ شهری در تصفیه‌خانه‌های کوچک و متوسط اهمیت بیشتری پیدا کرده، بطوری‌که در ۹۶ تصفیه‌خانه فاضلاب ساخته شده در آمریکا با دبی کمتر از ۴۵۴۶ مترمکعب در روز از هاضم بی‌هوازی استفاده شده است (shen et al., 2015). در سال‌های اخیر در کشور، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متعددی با فرآیند بخش مایع دارای ته‌نشینی اولیه (تولید لجن خام) و بخش لجن با هاضم هوازی احداث شده‌اند که در این فرآیندها انرژی زیادی صرف هوادهی می‌شود. تصفیه‌خانه فاضلاب التیمور مشهد، کرج (ماهدشت)، بهارستان اصفهان، ساری (کل مدول‌ها) و نهاوند به ترتیب با ظرفیت ۸۰۰۰۰، ۵۷۰۰۰، ۹۶۰۰۰، ۴۰۰۰۰ و ۳۵۰۰۰ متر مکعب در شبانه روز نمونه‌ای از این تصفیه‌خانه‌ها می‌باشند. هدف از این مطالعه، بررسی موردی فرآیند مورد استفاده در یکی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ساخته شده در کشور با دبی ۸۰۰۰۰ مترمکعب در روز با فرآیند MLE در بخش مایع و هاضم هوازی در بخش لجن و مقایسه میزان انرژی مصرفی در این تصفیه‌خانه با انرژی مصرفی شده در برخی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ساخته شده در جهان و مسائل مربوط به بهره‌برداری و ارائه پیشنهاداتی جهت بهینه‌سازی انرژی می‌باشد.

## ۲- روش تحقیق

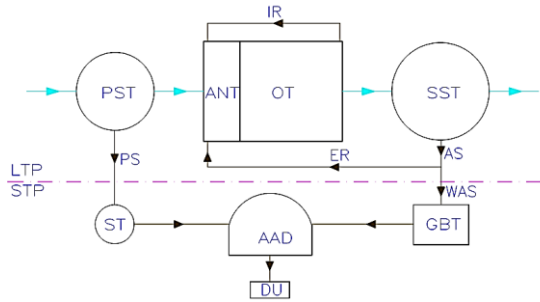
## • مشخصات تصفیه‌خانه

تصفیه‌خانه فاضلاب مورد مطالعه در این مقاله، در دو مدول و چهار خط جریان برای جمعیت ۵۰۰،۰۰۰ نفر و دبی متوسط حدود ۸۰،۰۰۰ مترمکعب در روز احداث شده است. مطابق شکل ۱، فرآیند استفاده شده در بخش مایع MLE و در بخش لجن تغلیظ (تغلیظ ثقلی برای لجن

تحقیق انجام شده توسط هاو در سال ۲۰۱۹ با روش ارزیابی چرخه حیات در خصوص توجه محیط‌زیستی احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نشان داد، بازیابی منابع (استفاده مجدد از پساب) دیگر به تنهایی در توجه محیط‌زیستی ساخت تصفیه‌خانه‌ها کافی نبوده و احداث تنها در صورت بازیابی توامان منابع آبی و انرژی (مانند استفاده از هاضم بی-هوازی)، می‌تواند اثرات محیطی نامطلوب هم‌چون انتشار گازهای گلخانه‌ای و نیاز به استفاده از مواد و انرژی ساخت را توجیه‌پذیر نماید (Hao et al. 2017). تصفیه فاضلاب به دو بخش کلی تصفیه مایع و لجن تقسیم شده و به طور معمول به فرآیند بخش مایع و انطباق کیفیت پساب تصفیه شده با استانداردهای موجود توجه بیشتری می‌گردد. در حالی که تصفیه و مدیریت لجن یکی از مهم‌ترین، پیچیده‌ترین و هزینه‌برترین بخش‌های تصفیه‌خانه‌های فاضلاب محسوب شده (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). 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 جهت کاربرد در زمین طبق تعریف استاندارد EPA براساس کلاس A و B می‌باشد. به دلیل 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 می‌باشد. از سه روش تثبیت بیولوژیکی، شیمیایی و گرمایی، سیستم‌های متعارف تصفیه لجن برای دستیابی به کلاس B، هاضم‌های هوازی و بی‌هوازی می‌باشند که هر یک مزایا و معایبی دارند. 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، به طور معمول سیستم مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های متوسط و بزرگ (دبی بیش از ۲۲۷۳۰ مترمکعب در روز) از نوع هاضم بی‌هوازی می‌باشد (Timothy et al., 2017; shen et al., 2015). 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 می‌گردد. طبق تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۱۵ در آمریکا، ۳ تا ۴ درصد از 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). براساس گزارش ارائه شده WERF<sup>۱</sup>، 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 به ازای هر مترمکعب فاضلاب تصفیه شده می‌باشد. لذا در صورت بازیابی کامل انرژی از فاضلاب، می‌توان علاوه بر تامین کل انرژی مورد نیاز در واحدهای مختلف تصفیه فاضلاب، انرژی مزاد تولیدی را در اختیار

1- Water Environment Research Foundation (WERF)

طرح پایه (هاضم هوازی) با سیستم هاضم بی‌هوازی مورد بررسی قرار گرفته که در شکل ۲ فلودیگرام مربوطه نشان داده شده است.



شکل ۲- فلودیگرام فرآیندی تصفیه بخش مایع و لجن تصفیه مورد مطالعه پیشنه‌های (بخش مایع MLE و بخش لجن هاضم بی‌هوازی)

### ۳- نتایج

در جدول شماره ۲، ضرایب سینتیکی جهت طراحی فرآیند در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و در جدول شماره ۳، میزان تولید لجن اولیه و ثانویه به تفکیک برای دو سن لجن مختلف طرح پایه آورده شده است (Tchobanoglous et al., 2014). لازم به توضیح است در این تصفیه‌خانه، ۴ واحد تانک ته‌نشینی اولیه به قطر ۲۵ متر احداث شده که میزان حذف  $BOD_5$ ، TSS 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 تغلیظ کننده ثقلی و غلظت لجن ثانویه از ۰/۸ درصد توسط تغلیظ کننده مکانیکی به حدود ۴ در نظر گرفته شد.

جدول ۲- ضرایب سینتیک مورد استفاده در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (Tchobanoglous et al., 2014)

پارامتر	مقدار	واحد
$\mu_{max}$	6	gVSS/gVSS.d
$b_H$	0.12	gVSS/gVSS.d
$Y_H$	0.45	gVSS/gbCOD
$f_d$	0.15	unitless
$\mu_{max,AOB}$	0.9	gVSS/gVSS.d
$b_{AOB}$	0.17	gVSS/gVSS.d
$Y_n$	0.15	gVSS/gNOx

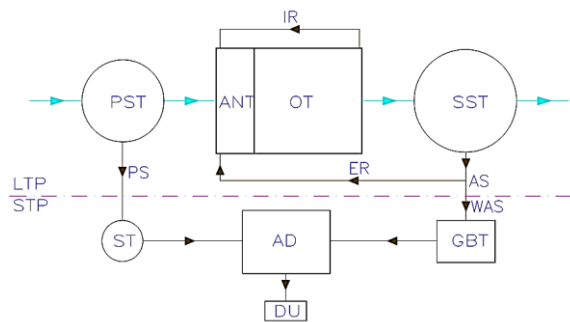
جدول ۳- میزان تولید لجن اولیه و ثانویه قبل و پس از تغلیظ در طرح پایه (مترمکعب در روز)

ردیف	زمان ماند سلولی (روز)	لجن اولیه	لجن ثانویه	لجن اولیه پس از تغلیظ	لجن ثانویه پس از تغلیظ
۱	۷	۵۴۵	۱۳۶۶	۳۴۰	۲۷۳
۲	۱۰	۵۴۵	۱۲۶۲	۳۴۰	۲۵۲

### • محاسبه میزان انرژی مصرفی طرح پایه

محاسبات میزان انرژی مصرفی براساس محاسبات مشاور طرح انجام شده و جهت مقایسه بهتر از مشخصات بلوئر استفاده شده در این تصفیه‌خانه (ظرفیت ۳۸۰۰ مترمکعب در روز، فشار ۶۵۰ میلی‌بار و توان ۱۵۰ کیلووات) استفاده گردید. جدول ۴، تعداد کل بلوئرها را جهت

خام و تغلیظ مکانیکی برای لجن ثانویه)، تثبیت به روش هاضم هوازی و آبیگری می‌باشد.



شکل ۱- فلودیگرام فرآیندی تصفیه بخش مایع و لجن تصفیه مورد مطالعه موجود (بخش مایع MLE و بخش لجن هاضم هوازی)

**Sludge Treatment Process (STP)/Primary Settling Tank (PST)/Secondary Settling Tank (SST)/Anoxic Tank (ANT)/Oxic Tank (OT)/Aerobic Digester (AD)/Anaerobic Digester (AND)/Active Sludge (AS)/Waste Sludge (WS)/ Internal Recycle (IR)/External Recycle (ER)/Gravity belt thickener (GBT)/Modified Ludzack-Ettinger (MLE)/Dewatering Unit (DU)**

### • مشخصات فاضلاب و پساب

جدول ۱، مشخصات فاضلاب ورودی، پساب خروجی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است این تصفیه‌خانه با هدف دستیابی به کیفیت پساب خروجی جهت تخلیه به آب‌های سطحی منطبق بر استاندارد سازمان محیط زیست ایران و با هدف تبدیل لجن به جامدات بیولوژیکی کلاس B جهت کاربرد در زمین طراحی شده است.

جدول ۱- مشخصات فاضلاب ورودی، پساب خروجی

پارامتر	واحد	فاضلاب ورودی	پساب خروجی
COD	mg/L	۵۳۲	۶۰
$BOD_5$		۲۶۶	۳۰
TN		۴۰	۱۶
TSS		۳۲۵	۴۰
TP		۹	۶

مشخصات فاضلاب و پساب از مطالعات مشاور استخراج شده است.

### • بررسی فرآیند تصفیه و بهینه سازی فرآیند با هدف کاهش مصرف انرژی

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که سن لجن یک پارامتر مهم طراحی و بهره‌برداری فرایندهای 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 (Tchobanoglous et al., 2014; Turovskiy and Mathai 2006). حداقل SRT جهت انجام فرآیند نیتروبیفیکاسیون در دمای ۲۰ درجه برای غلظت‌های آمونیوم ورودی و خروجی به ترتیب ۴۵ و کمتر از ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر بر حسب نیتروژن، ۴ روز است (Henze et al., 2008) که 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 این مطالعه به منظور کاهش مصرف انرژی و تولید برق و گرما از بیوگاز تولیدی (سیستم CHP)، جایگزینی

• مقایسه میزان انرژی مصرفی

در جدول ۶ میزان کل انرژی مصرفی و مجزا در بخش‌های مختلف در برخی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب احداث شده در جهان و مقایسه آن با سیستم تصفیه مورد مطالعه آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مصرف انرژی فلودیاگرام طرح پایه (شکل ۱) در مقایسه با این تصفیه‌خانه‌ها، ۲ تا ۳ برابر می‌باشد. با توجه به نتایج جدول، میزان انرژی مصرفی در تصفیه‌خانه مورد مطالعه ۱ کیلووات به ازاء هر مترمکعب بوده که نسبت به سایر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در جهان مقدار بالایی می‌باشد. اما در صورت تغییر سیستم و احداث هاضم‌های بی‌هوازی میزان انرژی مصرفی ۰/۵۸ کیلووات به ازاء هر مترمکعب خواهد شد که نسبت به حالت احداث هاضم‌های هوازی، میزان انرژی مصرفی کمتر خواهد شد همچنین در صورت احداث هاضم‌های بی‌هوازی بیشتر از ۴۵ درصد انرژی با تولید برق از گاز متان بازیابی خواهد شد.

جدول ۶- انرژی مصرفی کل و تفکیک شده در بخش‌های مختلف تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و تصفیه‌خانه مورد مطالعه

مراجع	توزیع انرژی مصرفی (درصد)			مصرف انرژی (kWh/m <sup>3</sup> )	مشخصات و موقعیت تصفیه خانه فاضلاب
	سایر واحدها	لجن	واحد هوادهی		
Gans et al. (2007)	۲۸	۵	۵۷	۰/۲۶	تصفیه‌خانه فاضلاب پیشرفته چین با جمعیت ۲۴۰۰۰۰۰ نفر (Beijing)
Panepinto et al. (2016)	۲۰	۲۹	۵۱	۰/۳	تصفیه‌خانه فاضلاب تورین ایتالیا با جمعیت ۲۷۰۰۰۰۰ نفر
Jonasson (2007)	۳۰	۱۳	۵۷	۰/۳۲	تصفیه‌خانه فاضلاب استرالیا با جمعیت ۲۵۰۰۰۰ نفر (Strass)
Maktabifard et al. (2018)	-	-	-	۰/۴۳	تصفیه‌خانه فاضلاب شیویگان آمریکا
Hao et al. (2015)	۳۸	۱۴	۴۸	۰/۴۸	تصفیه‌خانه فاضلاب سوئد با جمعیت ۵۰۰۰۰۰ نفر
Maktabifard et al. (2018)	۱۸	۷	۷۷	۰/۳	تصفیه‌خانه فاضلاب تبریز (بعد از ارتقا) با دبی ۱/۵ m <sup>3</sup> /s
This study	۲۰	۴۲	۳۸	۱	تصفیه‌خانه مورد مطالعه با جمعیت ۵۰۰۰۰۰ نفر با هاضم هوازی
This study	۳۶	۳	۶۱	۰/۵۸	تصفیه‌خانه مورد مطالعه با جمعیت ۵۰۰۰۰۰ نفر با هاضم بی‌هوازی

۴- نتیجه گیری

از نتایج این تحقیق در تصفیه‌خانه فاضلاب مورد مطالعه با هاضم هوازی و اصلاح آن به هاضم بی‌هوازی می‌توان نتیجه گرفت، میزان انرژی مصرفی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با واحد ته‌نشینی اولیه (تولید لجن خام) و با هدف دستیابی به جامدات بیولوژیکی با استاندارد کلاس B لجن، در صورت استفاده از هاضم هوازی به جای بی‌هوازی حدود ۲ برابر بوده و در صورت استفاده از هضم هوازی 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 جهت کاهش قابل توجه انرژی استفاده

هوادهی به صورت مجزا در بخش مایع و لجن و همچنین میزان توان مصرفی و انرژی تولیدی در تصفیه‌خانه را نشان می‌دهد. جدول ۴- توان مصرفی در فرآیندهای مختلف بر حسب کیلووات در طرح پایه (هاضم هوازی)

تعداد کل بلوئرها (لجن + مایع)	۱۷ (۸+۹)
توان مصرفی جهت هوادهی (کیلووات)	۲۵۵۰
توان مصرفی در سایر واحدها (کیلووات)	۷۵۵
کل توان مصرفی تصفیه‌خانه (کیلووات)	۳۳۰۵
میزان کل انرژی مصرفی (کیلووات ساعت در مترمکعب)	۱
میزان انرژی مصرفی هوادهی (کیلووات ساعت در مترمکعب)	۰/۷۷

مطابق جدول ۴، میزان اکسیژن مورد نیاز جهت هوادهی بخش‌های مایع و لجن، در فلودیاگرام این تصفیه‌خانه 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 گردید که از این میزان انرژی مصرفی، بیش از ۷۵ درصد صرف هوادهی بخش مایع و لجن می‌شود.

• محاسبه میزان انرژی در صورت تغییر سیستم تثبیت لجن

در فرآیند پایه با هاضم هوازی حدود ۴۰ درصد انرژی مصرفی در بخش لجن مصرف شده که در صورت تغییر سیستم هاضم از نوع هوازی به بی‌هوازی، علاوه بر کاهش انرژی مصرفی تا ۴۰ درصد، در شرایط تولید برق و گرما از بیوگاز تولیدی (سیستم CHP) نیز، مصرف انرژی کاهش بیشتری خواهد یافت و می‌توان از بخشی از انرژی تولید شده، در هاضم‌ها به میزان ۹۴۰ کیلووات برای تامین برق تصفیه‌خانه استفاده نمود. همچنین میزان متوسط متان تولیدی در لجن اولیه و ثانویه به ترتیب برابر ۰/۲۸۰ و ۰/۱ کیلوگرم به ازای هر کیلوگرم VSS اضافه شده می‌باشد، لذا در صورت استفاده از فرآیندهایی با واحد ته‌نشینی اولیه (تولید لجن خام) استفاده از فرآیند هاضم بی‌هوازی لجن مزایای زیادی به همراه داشته (Ruffino et al. 2019; Borzooei et al. 2019) و در صورت استفاده از هاضم هوازی، علاوه بر عدم استفاده از مزایای فوق، انرژی زیادی در بخش لجن صرف هوادهی می‌شود. جدول ۵، تعداد کل بلوئرها را جهت هوادهی به صورت مجزا در بخش مایع و لجن و همچنین میزان توان مصرفی و انرژی تولیدی در تصفیه‌خانه را در صورت استفاده از هاضم بی‌هوازی (سیستم CHP)، نشان می‌دهد.

جدول ۵- توان مصرفی در فرآیندهای مختلف بر حسب کیلووات با هاضم بی‌هوازی

تعداد کل بلوئرها (لجن + مایع)	۸ (۸+۰)
توان مصرفی جهت هوادهی (کیلووات)	۱۲۰۰
توان مصرفی در سایر واحدها (کیلووات)	۷۵۵
کل توان مصرفی تصفیه‌خانه (کیلووات)	۱۹۵۵
میزان کل انرژی مصرفی (کیلووات ساعت در مترمکعب)	۰/۵۸
میزان انرژی مصرفی هوادهی (کیلووات ساعت در مترمکعب)	۰/۳۷

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در دست مطالعه با جمعیت‌های بالا، بازبینی و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب احداث شده و در مدار بهره برداری بهینه‌سازی شوند.

نمود. با توجه به مزایای متعدد زیست‌محیطی و اقتصادی در صورت استفاده از مصرف کم انرژی در تصفیه فاضلاب و از طرفی احداث یا بهینه‌سازی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در جهان با هدف خودکفایی در تامین انرژی از فاضلاب ورودی، ضروری است در انتخاب فلودیاگرام

#### منابع

- 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*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.068>.
- Chen S. and Chen B., (2016), " Urban energy–water nexus: a network perspective", *Appl Energy* 184:905–914. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.03.042>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.444>
- Jiang S., Wang J., Zhao Y et al (2016), "Residential water and energy nexus for conservation and management: a case study of Tianjin", *Int J Hydrogen Energy* 41:15919–15929. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.04.181>
- 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(6–7):1571–82.
- 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", *J. Environ. Manag.* 157,250–261.
- 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", *Bioresour. Technol.* 129, 229–235.
- 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 (WAS) through intermediate treatments: the effect of the hydraulic retention time (HRT) of the first-stage digestion", *Appl. Energy* 240, 191–204.
- 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 (2019) 1182–1189. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.241>.
- Awe, O. W., Liu, R., and Zhao, Y. (2016), "Analysis of energy consumption and saving in wastewater treatment plant: case study from Ireland" *J. Water Sustain.* 6, 63–76. doi: 10.11912/jws.2016.6.2.63-76.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H.D., Tsuchihashi, R. and Burton, F., (2014), " Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery", fifth ed. McGraw Hill Education, Metcalf & Eddy/AECOM, New York.
- Turovskiy, I.S., Mathai, P.K., (2006), *Wastewater Sludge Processing*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.
- Marta Gandiglio, Andrea Lanzini, Alicia Soto, Pierluigi Leone and Massimo Santarelli (2017), "enhancing the energy Efficiency of Wastewater Treatment Plants through Co-digestion and Fuel Cell Systems", *Frontiers in Environmental Science*. doi:10.3389/fenvs.2017.00070.
- Longo, S., d'Antoni, B. M., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone. and F., et al. (2016), "Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement", *Appl. Energy* 179, 1251–1268. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.043.
- Hao, X., Liu, R., and Huang, X. (2015), " Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China", *Water Research*, 87, 424–431. doi: 10.1016/j.watres.2015.05.050.
- Belloir, C., Stanford, C., and Soares, A. (2015), "Energy benchmarking in wastewater treatment plants: the importance of site operation and layout", *Environ. Technol.* 36, 260–269. doi: 10.1080/09593330.2014.951403.

- N, Mobini S, Zhang XN (2007), "Appendix E. Mass and energy balances at the Gaobeidian wastewater treatment plant in Beijing, China", pp 203–209. <http://www.chemeng.lth.se/exjobb/E458.pdf>.
- Panepinto D, Fiore S, Zappone M et al (2016), " Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy", *Appl Energy* 161:404–411. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.027>
- Jonasson M., (2007), "Energy benchmark for wastewater treatment processes - A comparison between Sweden and Austria", In: Department of Industrial electrical engineering and automation, Lund University, Sweden.
- Mojtaba Maktabifard .Ewa Zaborowska. and Jacek Makinia (2018), "Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants through energy savings and enhancing renewable energy production", *Rev Environ Sci Biotechnology* 17:655–689.
- Shen, Y., Linville, J. L., Urgun-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", *Renew. Sustain. Energy Rev.* 50, 346–362. doi: 10.1016/j.rser.2015.04.129.
- Water Environment Research Foundation (WERF) (2016), *WERF Energy Factsheet*. Alexandria: Water Environment & Reuse Foundation.
- Timothy E. Seiple, Andre M. Coleman, Richard L. Skaggs, (2017), "Municipal wastewater sludge as a sustainable bioresource in the United States", *Journal of Environmental Management* 197 (2017) 673-680.
- Henze M., Loosdrecht, M.C.M., Kkama, G. and Brdjanovic, D. (2008, ") biological wastewater treatment. Principle, modeling and design", IWA publishing.
- marcols von sperling., (2007), "biological wastewater treatment series, wastewater characteristics, treatment and disposal", IWA publishing.
- Miklos Patziger, Frank Wolfgang Günthert, Norbert Jardin, Harald Kainz and Jörg Londong (2016), " On the design and operation of primary settling tanks in state of the art wastewater treatment and water resources recovery", *Water Science & Technology*. doi: 10.2166/wst.2016.349. IWA Publishing (2060-2067)
- Syed R. Qasim and Guang Zhu., (2018), "Wastewater Treatment and Reuse Theory and Design Examples", Taylor & Francis Group.
- Shen, Y., Linville, J. L., Urgun-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. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 50,346–362. doi: 10.1016/j.rser.2015.04.129.