نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۲۳ – ۷

استقرار سیستم مدیریت مصرف انرژی در یک نمونه بیورآکتور لجن فعال تصفیه‌خانه فاضلاب

[۱] رضا فتاحی * ، [۲] یونس نورالهی

تاریخ دریافت:
۱۳۹۷ / ۹ / ۲۰

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۹ / ۳ / ۶

کلمات کلیدی:
تصفیه‌خانه فاضلاب لجن فعال، سیستم مدیریت مصرف انرژی، بیورآکتور لجن فعال، راندمان اکسیژن‌دهی استاندارد (SAE)

چکیده

سهم مصرف انرژی الکتریکی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب جهان در حدود ۳٪ از کل مصرف انرژی جهان و نیز سهم مصرف انرژی واحد هوادهی بیورآکتور تصفیه‌خانه فاضلاب لجن فعال در حدود ۵۵٪ از کل مصرف تأسیسات می‌باشد، بر این اساس کاهش در سهم مصرف انرژی سیستم هوادهی می‌تواند اقدام مؤثری در کنترل میزان مصرف انرژی و هزینه‌های مرتبط با آن باشد. بهبود در مصرف انرژی بیورآکتور لجن فعال تصفیه‌خانه فاضلاب از طریق استقرار سیستم مدیریت مصرف انرژی میسر می‌شود. در این مقاله با بکارگیری مدل نرم‌افزاری مبتنی بر روابط فرآیندی تصفیه فاضلاب و روابط ترمودینامیکی، طراحی سیستم مدیریت مصرف انرژی در بیورآکتور تصفیه‌خانه فاضلاب لجن فعال انجام شده و یک نمونه مطالعاتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این نمونه مطالعاتی استقرار سیستم مدیریت انرژی منجر به ارتقای مقدار شاخص راندمان اکسیژن‌دهی استاندارد سیستم هوادهی از ۳۷/۱ kgO2/kWh. تا حدود ۵/۲kgO2/kWh می‌گردد. مطابق نتایج حاصل از بررسی نمونه مطالعاتی در صورت استقرار سیستم مدیریت انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کشور به عنوان یک روش مؤثر، پتانسیل کاهش مصرف انرژی در حدود ۳۷ میلیون کیلووات ساعت سالیانه معادل۱۲ صرفه‌جوئی میلیون متر مکعب در مصرف گاز طبیعی و عدم انتشار ۹۴۰۰ تن گاز گلخانه‌ای دور از دسترس نیست.

۱. کارشناس ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی و ریاست گروه توسعه طرح‌های بهره‌وری انرژی و اصلاح الگوی مصرف سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا). (نویسنده مسئول) r.fattahi75@yahoo.com
۲. مدیریت گروه انرژی‌های نو و محیط زیست دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران Noorollahi@ut.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

۱. مقدمه

امکان‌پذیر نمودن استفاده مجدد از پساب حاصل از فرآیند تصفیه فاضلاب در یک فعالیت شهری یا صنعتی، علاوه بر کاهش اثرات منفی زیست محیطی تخلیه فاضلاب به محیط، می‌تواند به عنوان یک منبع پایدار تأمین مجدداً آب را به چرخه بازگردد [۴].

مطابق مطالعات انجام پذیرفته توسط US EPA تا سال ۲۰۲۰ سهم مصرف انرژی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب جهان تا حدود ۲۰٪ افزایش خواهد داشت، از نقطه‌نظر انرژی‌بری نیز تأسیسات تصفیه فاضلاب کره زمین بیش از ۱٪ کل مصرف انرژی جهان را به خود اختصاص می‌دهند(تشیعی و محمد قاسمی، ۱۳۹۵). هرچند که بر اساس برآوردهای دیگر مصرف انرژی الکتریکی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در حدود ۲٪ تا ۴٪ ارزیابی می‌شود [۱۳]. بر اساس گزارش مشابه ارائه شده از موسسه تحقیقاتی برق (EPRI) مصرف انرژی الکتریکی تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب ایالات متحده آمریکا نیز در حدود ۳٪ کل مصرف انرژی الکتریکی آن کشور معادل ۷۵ میلیارد کیلووات ساعت می‌باشد [۱۳]. بر اساس بررسی‌های انجام شده بر روی اطلاعات سال ۹۷ شرکت‌های آب و فاضلاب شهری در سال ۹۷، میزان مصرف انرژی در تأسیسات تصفیه، انتقال و توزیع آب و نیز جمع‌آوری، انتقال و تصفیه فاضلاب شهری ایران در حدود ۴۹۲۰ میلیون کیلو وات ساعت برآورد شده است، همچنین مطابق با اطلاعات فوق‌الذکر، سهم مصرف انرزی در تأسیسات تصفیه فاضلاب در حدود ۴/۹٪ و بالغ بر۲۴۱ میلیون کیلو وات ساعت ارزیابی گردیده است [۱]. دلایل مذکور اهمیت ارزیابی مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و تلاش جهت کنترل و بهینه‌سازی مصرف انرژی آنها به عنوان یک اصل غیر قابل انکار مطرح است.

۲. مرور ادبیات تحقیق

بر اساس دانش و تجربیات موجود درخصوص تصفیه انواع فاضلاب، در حال حاضر می‌توان ادعا کرد که با دانش زیست محیطی خوب و تجزیه و تحلیل مناسب می‌توان تقریباً همه انواع فاضلاب‌هایی را که از مواد قابل تجزیه بیولوژیکی تشکیل شده است به روش بیولوژیکی تصفیه نمود [۸]. اهداف کلی تصفیه بیولوژیکی فاضلاب شهری، شامل تبدیل مواد قابل تجزیه بیولوژیکی کلوئیدی (مانند اکسیداسیون) و

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

محلول به محصولات نهایی قابل پذیرش، تله کردن و ترکیب مواد جامد کلوئیدی (مانند اکسیداسیون) و معلق غیر قابل ته‌نشینی به لخته‌های بیولوژیکی یا بیوفیلم، تبدیل یا حذف مواد مغذی مانند فسفر و نیتروژن و در بعضی موارد حذف ترکیبات آلی خاص جزئی می‌باشند [۱۴].

در کنار تنوع پارامترهای کمی و کیفی فاضلاب حاصل از زندگی انسان در جوامع شهری و همچنین فعالیت‌های بشری در فرآیندهای توسعه صنعتی، استفاده از روش مناسب تصفیه فاضلاب (از بین انواع روش‌های متعدد اعم از هوازی، بی‌هوازی و روش‌های تلفیقی) با هدف نیل به توسعه پایدار روشن است، بر این اساس انتخاب فرآیند بهینه در کنار ملاحظات مربوط به حداقل‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره برداری و نگهداری لزوم پرداختن به موضوع انتخاب روش بهینه تصفیه فاضلاب را آشکار می‌کند [۵]. بر این اساس ضروری به‌نظر می‌رسد در کنار پرداختن به مباحث تخصصی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به موضوع مصرف بهینه انرژی و امکان‌سنجی استقرار مکانیزم سیستم‌های مدیریت انرژی انرژی نیز در انتخاب نوع فرآیند نیز پرداخته شود [۳]. همچنین ضروری است با توجه به اهمیت موضوع انرژی و هزینه‌های مرتبط با آن ، اقدامات مرتبط با کاهش مصرف انرژی و استقرار سیستم مدیریت مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کشور اجرایی شود [۲]. این مهم اقتضا می‌کند که متخصصان و طراحان این تأسیسات در طرح‌های پیشنهادی خود، سرفصل انرژی‌بری تأسیسات را نیز در کنار سایر ملاحظات طراحی فرآیندی لحاظ نمایند [۱۶]. با این هدف‌گذاری مدیریت هزینه‌ها همواره بهینه‌سازی مصرف انرژی در فرآیند تصفیه فاضلاب و ارتقای کارایی انرژی در تجهیزات و تأسیسات آن همواره برقرار می‌گردد، البته قابل ذکر است که از سایر منافع این امر می‌توان به اثرات خوب زیست محیطی این اقدامات نیز اشاره کرد [۱۱]. در فرآیندهای تصفیه فاضلاب میزان مصرف انرژی اکتریکی وابسته به مقدار اکسیژن مورد نیاز فرآیند و متاثر از میزان مصرف هوای معادل آن می‌باشد، در یک سیستم تصفیه فاضلاب لجن فعال با تغییر در غلظت پارامترهای فاضلاب ورودی (مانند آمونیم یا آمونیاک) نرخ مورد نیاز اکسیژن، هوا و میزان انرژی مورد نیاز تأمین آن تغییر خواهد کرد [۱۱].

در حال حاضر تصفیه بیولوژیکی انواع فاضلاب‌های صنعتی و شهری اغلب از طریق هوادهی در فرآیند لجن فعال انجام می‌شود. بیورآکتورهای هوادهی به عنوان قلب تپنده تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به تنهائی در حدود بازه ۲۵٪ تا ۶۰٪ از کل مصرف انرژی تأسیسات مذکور را به خود اختصاص می‌دهد، بر اساس مطالعه میدانی بین‌المللی درخصوص تفکیک مصرف انرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب، سهم مصرف

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

انرژی واحد هوادهی بیورآکتور در حدود ۵۵٪ (بیش از نصف کل انرژی مصرفی تأسیسات) ارزیابی می‌شود، سهم مصرف انرژی سیستم پمپاژ نیز با حدود ۲۰٪ در جایگاه دوم می‌باشد. بر این اساس سهم هزینه انرژی مصرفی تأسیسات هوادهی ۷۰٪ از کل هزینه‌ها شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تعمیرات و نگهداری و هزینه انرژی الکتریکی مصرفی در طول عمر تأسیسات تصفیه‌خانه می‌باشد[۱۲]. همچنین نتایج یک مطالعه عملیاتی ملی نشان می‌دهد که پس از انجام اقدامات بهینه‌سازی در سیستم هوادهی و سیستم پمپاژ یک تصفیه‌خانه فاضلاب، سهم میزان انرژی مصرفی بترتیب به ۴۲٪ و ۲۲٪ برای بخش‌های مذکور اصلاح می‌شود، لذا سهم بزرگ مصرف انرژی در سیستم هوادهی یک تصفیه‌خانه بهبود یافته نشان از اهمیت انجام اقدامات بهودی در این زمینه دارد [۸]. لذا عملکرد بهینه سیستم هوادهی و تجهیزات و تأسیسات مرتبط با آن نقش قابل ملاحظه‌ای در راهبری مؤثر فرآیند، مصرف بهینه انرژی و کاهش هزینه‌های طراحی و بهره‌برداری تأسیسات دارد [۷].

با توضیحات فوق‌الذکر اهمیت طراحی مناسب واحد بیورآکتور و بخش هوادهی، انتخاب صحیح تجهیزات بخش هوادهی و کنترل عملکرد مناسب آنها در هزینه‌های احداث و بهره‌برداری تصفیه‌خانه آشکار است. اگر چه مفهوم مدیریت مصرف انرژی در کشور ما طی سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته شده است، لیکن این مبحث در سایرکشورها و علی‌الخصوص در کشورهای توسعه یافته سال‌هاست عملیاتی شده است، برخی دیگر از کشورهای در حال توسعه نیز در این زمیه پروژه هایی را به اجرا درآورده و تجربیاتی برای آنها حاصل شده است. مفهوم مدیریت مصرف انرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب این هدف مهم را میسر می‌کند، لذا جهت جلوگیری از پیچیدگی‌های ناشی از کل موضوع مصرف انرژی این تأسیسات در کلیه واحدها و نیز با توجه به سهم قالب مصرف انرژی در سیستم هوادهی تصفیه‌خانه لجن فعال (با سهم حداقلی مصرف بیش از ۵۰٪ از کل انرژی تأسیسات)، استقرار سیستم مدیریت انرژی منحصراً در بخش بیورآکتور لجن فعال تصفیه‌خانه پیشنهاد می‌شود. بر این اساس ضروری است جهت استقرار سیستم مدیریت انرژی در بیورآکتور لجن فعال تصفیه‌خانه فاضلاب، ارتباط معناداری برای تأمین بهینه میزان اکسیژن مورد نیاز فرآیند تصفیه فاضلاب با حداقل مصرف انرژی در بیورآکتور لجن فعال برقرار شود، این ارتباط ریاضی، از طریق برآورد شاخص استاندارد راندمان اکسیژن‌دهی ($SAE_{(kgO2/kWh)}$) که از نظر مفهومی نسبت میزان اکسیژن مورد نیاز فرآیند به میزان انرژی مصرفی در سیستم هوادهی تصفیه‌خانه می‌باشد ایجاد می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

۳. مدل ریاضی سیستم مدیریت مصرف انرژی تأسیسات

در این بخش صرفاً به تشریح و بررسی روابط ریاضی حاکم بر محاسبه اکسیژن مورد نیاز فرآیند، برآورد هوای متناظر و نیز ارزیابی انرژی لازم جهت تأمین هوای مذکور در فرآیند لجن فعال می‌پردازیم. بر اساس مفاهیم طراحی فرآیندی بیورآکتور میزان اکسیژن واقعی مورد نیاز متاثر از میزان حذف بارآلودگی COD (یا BOD)، میزان نیتریفیکاسیون و دی‌نیتریفیکاسیون فرآیند بوده و مقدار آن در شرایط سایت از رابطه (۱) برآورد می‌شود:

$$AOTR = Q_{ww}(S - S_0) - 1.42P_{X,bio} \quad (۱)$$
$$+4.33Q_{ww}(NO_X)$$
$$-2.86Q_{ww}(NO_X - NO_{X_e})$$

AOTR: نرخ واقعی انتقال اکسیژن در شرایط عملی بیورآکتور، kg O_2/d

Qww: دبی روزانه فاضلاب ورودی به هر بیورآکتور، m^3/tank.d

S-S0: اختلاف غلظت شاخص بار آلودگی بیورآکتور، (g/m^3)

PX, bio: مقدار بایومس تولید شده در بیورآکتور، kg for SRT days

NOx: شاخص نیتروژن آمونیاکی طی فرآیند نیتریفیکاسیون بیورآکتور، (g/m^3)

NOxe: شاخص نیتروژن آمونیاکی طی فرآیند دی‌نیتریفیکاسیون بیورآکتور، (g/m^3)

با اعمال عوامل تصحیح کننده شرایط سایت به شرایط استاندارد شامل تأثیر شرایط اقلیمی سایت، عملکرد تجهیز هوادهی و میزان شوری فاضلاب، برآورد میزان اکسیژن مورد نیاز طرح در شرایط نرمال از رابطه (۲) بازبینی می‌شود:

$$SOTR = AOTR \quad (۲)$$
$$(\frac{C_{S,20}}{\alpha F(\beta C_{\overline{S,T,H}} - C)})(1.024^{20-T})$$

AOTR: نرخ انتقال اکسیژن واقعی در شرایط عملی بیورآکتور، kg O_2/d

SOTR: نرخ انتقال اکسیژن استاندارد (در شرایط آب تمیز با دمای ۲۰°C و اکسیژن محلول صفر) در بیورآکتور، kg O_2/d

CS^{-},T,H: متوسط غلظت اکسیژن محلول در آب تمیز در بیورآکتور، (mg/l)

C: متوسط غلظت اکسیژن حین بهره‌برداری بیورآکتور، (mg/l)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

$C_{S,20}$: غلظت اکسیژن محلول در آب تمیز با دمای ۲۰°C در بیورآکتور، (mg/l)

α: ضریب تصحیح انتقال اکسیژن فاضلاب در بیورآکتور

F: ضریب گرفتگی تجهیز هوادهی در بیورآکتور

ß: ضریب اصلاح کشش سطحی سیال و شوری آن در بیورآکتور

T: دمای هوا در شرایط بهره‌برداری سایت، °K

با تأثیر عمق مؤثر بیورآکتور حین هوادهی و راندمان ویژه انتقال اکسیژن تجهیز هوادهی، محاسبه هوای مورد نیاز سایت در شرایط نرمال نیز از طریق رابطه ۳ انجام می‌شود:

$$Q_{air} = \frac{SOTR}{(SOTE)(\rho_{Normal})(\%O_2)} \quad (۳)$$

Q_{air}: دبی حجمی هوای مورد نیاز در شرایط نرمال، Nm^3/hr

SOTR: نرخ انتقال اکسیژن استاندارد (در شرایط آب تمیز با دمای ۲۰°C و اکسیژن محلول صفر) در بیورآکتور، kg O_2/d

SOTE: راندمان ویژه استاندارد انتقال اکسیژن درسیستم هوادهی بیورآکتور، ٪ (استخراج از نمودار عملکردی تجهیز هوادهی)

$\%O_2$: میزان غلظت اکسیژن موجود در هوا در شرایط نرمال، ٪

با توجه به تأثیر شرایط اقلیمی بر عملکرد توربو بلوئرها، در تعیین ظرفیت مناسب بلوئرها لازم است تأثیر حداکثر دمای هوا و ارتفاع منطقه در انتخاب لحاظ شود. این اصلاح از طریق برآورد اعمال شرایط فشار و دمای سایت و اصلاح چگالی هوا انجام می‌شود، برآورد تأثیر ارتفاع و دمای سایت در فشار منطقه از طریق رابطه (۴) صورت می‌پذیرد:

$$P_{Site}/P_{Normal} = e^{-(\frac{gM(Z_{site}-Z_{Normal})}{RT})} \quad (۴)$$

P_{site}: فشار اتمسفریک در شرایط سایت، bar

g: شتاب جاذبه زمین، $9.81 m/s^2$

M: جرم مولکولی هوا، 28.97 kg/kg mole

Z_{Site}: ارتفاع سایت از سطح آزاد دریا، m

R: ثابت جهانی گازها، $8,314 kg.m^2/s^2.kg\ mole.\ °K$

T: دمای هوا در شرایط بهره‌برداری سایت، °K

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

تصحیح چگالی هوا با اعمال دما و فشار در شرایط منطقه از رابطه (۵) انجام می‌شود:

$$\rho_{P,T} = \frac{PM}{RT} \quad (۵)$$

$\rho_{P,T}$: چگالی هوا در شرایط سایت، kg/m^3

P_{site}: فشار اتمسفریک در شرایط سایت، bar

M: جرم مولکولی هوا، 28.97 kg/kg mole

R: ثابت جهانی گازها، 8,314 $kg.m^2/s^2.kg\ mole.\ °K$

T: دمای هوا در شرایط بهره‌برداری سایت، °K

جهت ارزیابی میزان انرژی مصرفی نیاز در بلوئرهای هوادهی تأمین هوای فرآیندی مورد نیاز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$P_W = \frac{\rho Q_{air} RT}{0.286 \varepsilon_{Blower}} [(\frac{P\ +\Delta P}{P})^{0.286} - 1] \quad (۶)$$

P_w: توان مصرفی بلوئرهای تأمین هوای فشرده، kW

$\rho_{P,T}$: چگالی هوا در شرایط سایت، kg/m^3

Q_{air}: دبی حجمی هوای بلوئردر شرایط سایت، $m^3/Sec.$

R: ثابت جهانی گازها، 8,314 $kg.m^2/s^2.kg\ mole.\ °K$

T: دمای هوا در شرایط بهره‌برداری سایت، °K

P_{site}: فشار اتمسفریک در شرایط سایت، bar

P_{site}: اختلاف فشار هوا در ورودی و خروجی بلوئر، bar

ε_{Blower}: راندمان انرژی کلی بلوئر، %

شایان ذکر است که علاوه بر امکان استفاده از رابطه (۴) جهت برآورد انرژی مصرفی در بلوئرها، میزان انرژی مصرفی سیستم هوادهی بیورآکتور در شرایط عملکردی مورد نظر از طریق استناد به اطلاعات فنی سازنده اظهار شده توسط سازنده تجهیزات در Data Sheet نیز قابل ارزیابی می‌باشد.

محاسبه شاخص راندمان اکسیژن‌دهی استاندارد جهت استقرار سیستم مدیریت انرژی در سیستم هوادهی بیورآکتور نیز بر اساس رابطه زیر انجام می‌پذیرد:

$$SAE = \frac{SOTR}{P_W} \quad (۷)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

SOTR: نرخ انتقال اکسیژن استاندارد (در شرایط آب تمیز با دمای ۲۰°C و اکسیژن محلول صفر) در بیورآکتور، kg O_2/d

P_w: توان مصرفی بلوئرهای تأمین هوای فشرده، kW

٤. بررسی استقرار سیستم مدیریت مصرف انرژی در یک نمونه مطالعاتی

در این بخش ارائه محاسبه شاخص راندمان اکسیژن‌دهی استاندارد سیستم هوادهی بیورآکتور برای یک نمونه مطالعاتی از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شهریار با متوسط ظرفیت روزانه ۴۰ هزار مترمکعب و جمعیت تحت پوشش ۲۴۰ هزار نفر مورد نظر می‌باشد. بخش سیال این تصفیه‌خانه شامل کانال ورودی، جعبه مقسم، آشغالگیر دستی، ایستگاه پمپاژ، آشغاگیر مکانیکی، تاسیسات دانه و چربی‌گیری، مخازن متعادل سازی قبل و بعد از بیورآکتور، واحد رآکتور ناپیوسته متوالی (SBR)، تاسیسات اندازه‌گیری دبی جریان ورودی و خروجی به بخش سیال و تاسیسات ضدعفونی پساب (UV) است. کل بار الکتریکی مورد نیاز تجهیزات الکترومکانیکال، حدود ۱۵۷۲kW در شرایط بهره‌برداری نرمال تأسیسات تصفیه‌خانه برآورد می‌شود. مشخصات اقلیمی جهت طراحی تصفیه‌خانه مورد نظر شامل حداکثر دمای هوای ۳۰°C و دمای فاضلاب ۲۰°C و ارتفاع منطقه ۱۱۰۰m a.s.l است. لازم به توضیح است که در مقاله حاضر طراحی کل بیورآکتور تصفیه‌خانه‌های فاضلاب فرآیند لجن فعال مورد نظر نبوده و منحصراً عملیاتی‌کردن ارزیابی کارایی مصرف انرژی و برآورد شاخص تأمین حداقل راندمان اکسیژن‌دهی استاندارد در یک نمونه تصفیه‌خانه با فرآیند رآکتور ناپیوسته متوالی (SBR) مورد نظر است. مشخصات فاضلاب ورودی برای پارامترهای طراحی فرآیندی شامل COD، BOD_5، TSS و TN بترتیب ۴۸۴mg/lit.، ۲۷۲mg/lit.، ۳۳۲mg/lit. و ۴۳mg/lit. و هدف‌گذاری خروجی تصفیه‌خانه برای پارامترهای BOD_5، TSS و TN نیز بترتیب ۳۰mg/lit.، ۴۰mg/lit. و ۶mg/lit. می‌باشد.

با توجه به طراحی تصفیه‌خانه بر اساس ۴ بیورآکتور موازی، دبی روزانه ورودی هر تانک ۱۰هزار متر مکعب فاضلاب بوده و مطابق با پارامتر طراحی زمان ماند لجن حدود ۱۳ روز و ضرایب سینتیکی طراحی فرآیند رآکتور ناپیوسته متوالی(SBR)، برآورد میزان اکسیژن واقعی مورد نیاز هر بیورآکتور بشرح زیر انجام می‌شود:

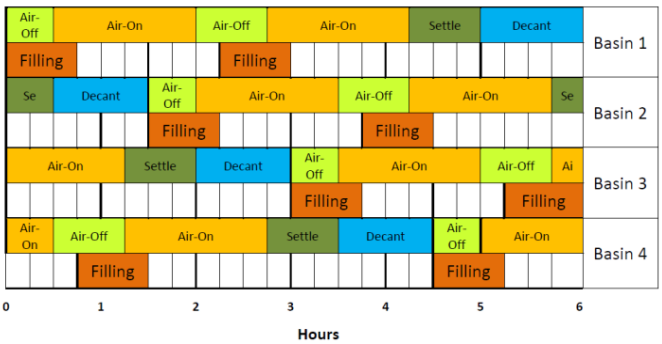
$$Q_{ww} = 10000_{m^3/d}$$
$$S - S_0 = 457.6_{mg/lit.}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

$P_{X,bio} = 934.2_{mg/lit.}$
$NO_X = 33.25_{mg/lit.}$
$NO_{Xe} = 5.25_{mg/lit.}$
$AOTR = 4660.8_{kgO_2/d}$

برای واحد رآکتور ناپیوسته متوالی(SBR) تصفیه‌خانه چهار رآکتور ناپیوسته متوالی در نظر گرفته شده است. از آنجا که هر رآکتور به‌صورت منقطع بهره‌برداری می‌شود، عملیات بهره‌برداری هر رآکتور طی چند سیکل در هر شبانه‌روز تکرار می‌شود. مطابق نمودار توالی زمانی ارائه شده در شکل (۱) برای شرایط بهره‌برداری نرمال تصفیه‌خانه کل زمان‌بندی سیکل مجموعاً ۳۶۰ دقیقه (معادل ۶ ساعت) است. در هر سیکل ۹۰ دقیقه زمان پرکردن بیورآکتور، ۱۶۵ دقیقه زمان انجام عملیات واکنش، ۴۵ دقیقه زمان ماند و ته‌نشینی سیال و ۶۰ دقیقه برای تخلیه بیورآکتور می‌باشد.

قابل ذکر است که در شرایط بهره‌برداری نرمال تصفیه‌خانه زمان هوادهی هر سیکل ۱۸۰ دقیقه است که ۳۰ دقیقه از آن درحین پرکردن تانک و ۱۵۰ دقیقه از آن همزمان با واکنش در فاز انوکسیک از طریق روشن و خاموش کردن هواده‌ها و میکسرها اتفاق می‌افتد، بنابراین برای شرایط عادی بهره‌برداری تصفیه‌خانه ۴ سیکل ۶ ساعته برای هر بیورآکتور و طی شبانه‌روز مجموعاً ۱۶ سیکل برای کل بیورآکتورها اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۱. نمودار توالی زمانی SBR در شرایط بهره‌برداری نرمال

در شرایط بهره‌برداری نرمال تصفیه‌خانه، ۴ سیکل ۶ ساعته برای هر بیورآکتور متصور است، با توجه به شکل (۱) مبنی بر زمان هوادهی معادل ۳ ساعت برای هر سیکل، برآورد میزان اکسیژن واقعی مورد نیاز هر بیورآکتور بشرح زیر انجام می‌شود:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

$$AOTR = \frac{4660.8_{kgO_2/d}}{4_{Cycle}(3_{hr/Cycle})} = 388.4_{kgO_2/hr}$$

با اعمال ضرایب تصحیح شرایط اقلیمی سایت شامل دمای طراحی هوای ۳۰°C، ارتفاع از سطح دریا ۱۱۱۰m و ضریب اصلاحی انتقال اکسیژن تجهیز هوادهی α برابر ۰/۸۵ و ضریب گرفتگی تجهیز هوادهی F برابر ۱ و همچنین اصلاح ضریب شوری فاضلاب ß با مقدار ۰/۹۸، همچنین اعمال سایر عوامل تصحیح کننده شرایط سایت به شرایط استاندارد بشرح زیر، برآورد میزان اکسیژن مورد نیاز در شرایط استاندارد بازبینی می‌شود:

$$C_{s,20} = 9.08_{mg/lit.}$$

$$C_{\bar{s},T,H} = 12.5_{mg/lit.}$$

$$C = 1.5_{mg/lit.}$$

$$SOTR = 483.8_{kgO_2/d}$$

شایان ذکر است که در فرآیند هوادهی رآکتور ناپیوسته متوالی (SBR) مورد نظر، مکانیزم هوادهی از نوع عمقی بوده و عملیات بهره‌برداری از طریق تأمین هوا توسط بلوئرها و توزیع آنها از طریق هواده/میکسر انجام می‌پذیرد. به عبارت دیگر تأمین هوای فرآیندی مورد نیاز این مورد مطالعاتی از طریق چیدمان ۱+۴ عدد بلوئر جابه‌جایی مثبت و توزیع آن از طریق ۱۲ عدد هواده/میکسر در داخل بیورآکتور (۳ عدد هواده/میکسر در ۴ بیورآکتور) صورت می‌پذیرد. بر اساس چیدمان ۳ عدد هواده/میکسر در هر بیورآکتور و همچنین اطلاعات مشخصات عملکردی تجهیز هوادهی اظهار شده در Data Sheet سازنده مبنی بر نرخ انتقال اکسیژن استاندارد ($SOTR_{(kgO2/hr)}$) و راندمان استاندارد انتقال اکسیژن SOTE) ((%) تجهیز هوادهی (شکل ۲) و نیز با اعمال ۵۰٪ افزایش ظرفیت مطابق با توجه به توصیه‌های مراجع محاسبات فرآیندی، برآورد هوای مورد نیاز سایت در شرایط نرمال بشرح زیر انجام می‌پذیرد:

$$Q_{air} = \frac{1.5(483.8_{kgO_2/hr})}{(0.341_{SOTE(\%)})(1.27_{kgair/Nm^3})(0.2096_{\%O_2})}$$

$$= 7994.8_{Nm^3/hr}$$

همان‌طوری‌که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، مشخصات توان مصرفی اظهار شده در Data Sheet سازنده مقدار ۳۳/۸kW را برای هر تجهیز هوادهی و مجموعاً ۱۰۱/۴kW برای هر بیورآکتور نشان می‌دهد.

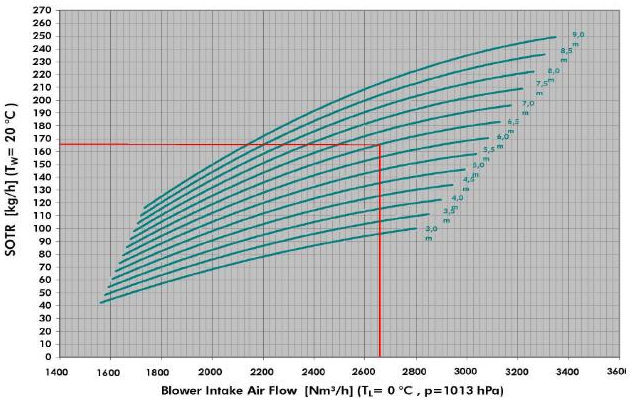
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

مطابق شکل (۱) در نمودار توالی زمانی سیکل SBR در شرایط نرمال بهره‌برداری تصفیه‌خانه، منحصراً دو بیورآکتور به‌طور همزمان در حال هوادهی می‌باشند، بنابراین با توجه به مشخصات طراحی مبنی بر تأمین هوای فرآیندی مورد نیاز از طریق چیدمان بلوئرهای جابه‌جایی مثبت با تعداد ۱+۴، تأمین هوای هر بیورآکتور از طریق ۲ بلوئر قابل انجام است، بنابراین تعیین ظرفیت هر بلوئر به‌صورت زیر برآورد می‌شود:

$$Q_{Blower} = \frac{7994.8_{Nm^3/hr}}{2} = 3997.5_{Nm^3/hr}$$

Oxygen Requirements (per basin)

- AOR:	388.4	kgO2/h
- SOTR:	483.8	kgO2/h
System design		
- Air flow per Mixer/Aerator:	2665	Nm^3/h
- Total air flow per basin:	7995	Nm^3/h
- Blower(s) intake air flow per SBR :	9750	m^3/h
- Pressure loss up to battery limit (incl. hydr. pressure) :	670	mbar
- Standard Oxygen Transfer Efficiency (SOTE):	34.1	%
- Standard Oxygen Transfer Rate ($SOTR_{20}$) :	161 (per Mixer/Aerator)	kgO2/h
- Mixer diameter:	2,500	mm
Aeration mode:		
- Speed:	45	1/min
- Installed motor power:	37	kW
- Power at motor shaft:	30.5	kW
- Power consumption:	33.8	kW
- Power density:	13.6	W/m^3
- Power reserve:	≥ 15	%



شکل ۲. مشخصات عملکردی تجهیز هوادهی در Data Sheet سازنده

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

با توجه به تأثیر شرایط عوامل اقلیمی بر عملکرد توربو ماشین‌ها، لازم است جهت انتخاب بلوئر با ظرفیت مناسب شرایط اقلیمی منطقه شامل حداکثر دمای هوای ۲۰°C و ارتفاع منطقه ۱۱۰۰m در سایزینگ تجهیز تأمین هوای فرآیندی لحاظ شود.

$$P_{Site} = e^{-\left(\frac{(9.81_{m/s^2})(28.97_{kg/kgmole})(1100_{m})}{(8314_{kg.m^2/s^2.kgmole^{\circ}K})(303.2_{^{\circ}K})}\right)} = 0.883_{bar}$$

تصحیح چگالی هوا با اعمال دمای هوای ۳۰°C و فشار منطقه برابر ۰/۸۸bar به‌طریق زیر انجام می‌شود:

$$\rho_{0.883bar,20^{\circ}C} = \frac{(0.883_{bar})(101325_{pa})(28.97_{kg/kgmole})}{(8314_{kg.m^2/S^2.kgmole^{\circ}K})(303.2_{^{\circ}K})} = 1.01_{kg/m^3}$$

بر این اساس بازبینی ظرفیت بلوئر بر اساس اطلاعات شرایط اقلیمی منطقه بشرح زیر انجام می‌شود:

$$Q_{Blower} = 3997.5_{Nm^3/hr} \frac{1.27_{kg/Nm^3air}}{1.01_{kg/m^3air}} = 5000_{m^3/hr}$$

لازم به‌ذکر است که در Data Sheet سازنده بلوئر (شکل ۳) توان مصرفی اظهار شده برای هر تجهیز ۱۳۱kW و مجموع توان مصرفی بلوئرها هر بیوراکتور ۲۶۲kW است.

Performance data:		**frequency converter**		
Medium		Air		
Intake volume, handled at intake condition	Q_1	m³/min	83.34	28.74
Intake volume, handled at intake condition	Q_1	m³/h	5001	1725
Volume handled at normal condition with reference to T1=273°K, p1=1,013 bar, rF=0%	Q_N	Nm³/h	4598	1586
Mass flow	m	kg/h	5942	2050
Density at inlet conditions	Rho_1	kg/m³	1.188	1.188
Intake pressure (abs.)	p_1	bar	1.000	1.000
Outlet pressure (abs.)	p_2	bar	1.750	1.750
Pressure difference	Δp	mbar	750	750
Intake temperature	t_1	°C	20	20
Discharge temperature	t_2	°C	91	107
Male rotor speed	n_{HR}	rpm	2270	960
Power consumption at coupling	P_k	kW	131	50.47
Motor speed	n_M	rpm	1490	596
Motor rating	P_{Mot}	kW	160	
Motor frequency	f	Hz	50	20
Tolerances				
for volume handled at intake condition		%	+5 / -5	
for power required at the coupling / coupling power		%	+5 / -5	
Machine noise each unit				
Sound pressure level without hood approx.	$L_p(A)$	dB(A)	103	
Sound pressure level with hood approx.	$L_p(A)$	dB(A)	80	

Measured in the free field in 1 m distance from the outline of the unit without radiating noise of the pipe (tolerances ± 2 dB(A)), in accordance with DIN EN ISO 2151.
Concerning sound development at place of installation please see TN01184 (please ask for if required).

شکل ۳. مشخصات عملکردی بلوئرهای هوا در Data Sheet سازنده

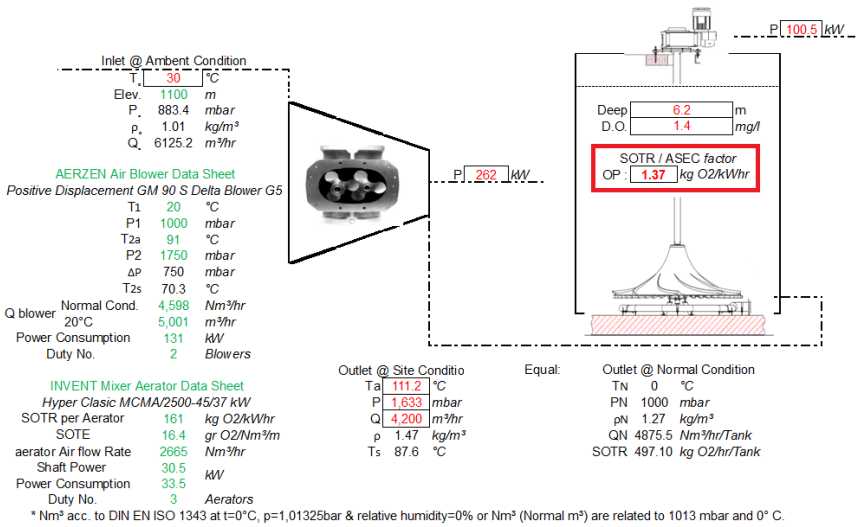
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

با توجه به اطلاعات فرآیندی نمونه مطالعاتی مورد نظر و برآورد میزان اکسیژن واقعی مورد نیاز فرآیند، شاخص راندمان اکسیژن‌دهی استاندارد ($SAE_{(kgO2/kWh)}$) سیستم هوادهی برای هر تانک بیورآکتور بشرح ارزیابی می‌شود:

$$SAE_{kgO_2/kWhr} = \frac{483.8_{kgO_2/hr}}{(3(33.8_{kW})+2(131_{kW}))}$$

$$= \frac{725.7_{kgO_2/hr}}{363.4_{kW}} = 1.33_{kgO_2/kWhr}$$

شکل (۴) شماتیکی از دیاگرام بلوکی سامانه ارزیابی کارایی مصرف انرژی رآکتور ناپیوسته متوالی (SBR) مورد مطالعاتی را نمایش می‌دهد.



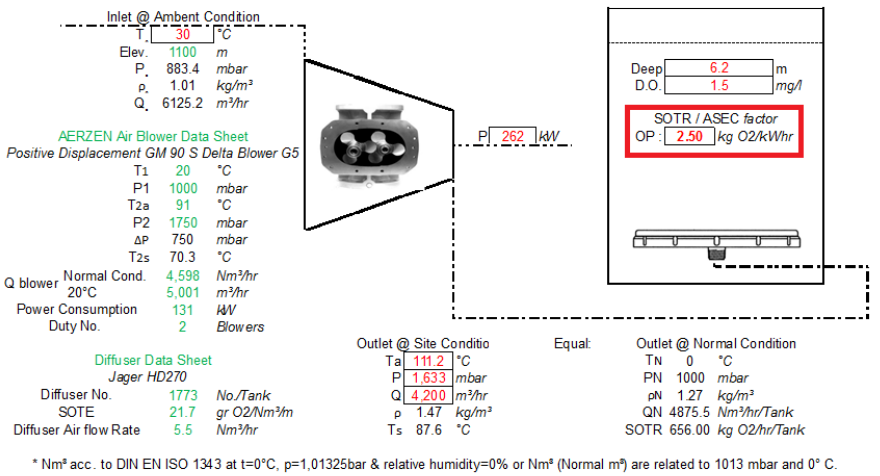
شکل ۴. دیاگرام بلوکی سامانه ارزیابی کارایی مصرف انرژی مورد مطالعاتی

با توجه به نمودار توالی زمانی عملکرد رآکتور ناپیوسته متوالی(SBR) مبنی بر هوادهی همزمان دو بیورآکتور و نیز چیدمان تجهیزات هوادهی بیورآکتور تصفیه‌خانه، در شرایط بهره‌برداری نرمال توان الکتریکی مصرفی سیستم هوادهی تصفیه‌خانه برابر ۷۲۶/۸kW ارزیابی می‌شود. بر اساس برآورد کل بار الکتریکی مورد نیاز تجهیزات الکترومکانیکال حدود ۱۵۷۲kW در شرایط بهره‌برداری نرمال تأسیسات

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

تصفیه‌خانه، سهم توان الکتریکی مصرفی سیستم هوادهی از کل بار الکتریکی مورد نیاز تجهیزات الکترومکانیکال حدود ۴۶٪ ارزیابی می‌شود.

بر اساس تجارب بین‌المللی، تأمین شاخص حداقل راندمان اکسیژن‌دهی استاندارد (SAE (kgO2/kWh)) به مقدار ۲/۵kgO2/kWh. برای بهره‌برداری از واحد هوادهی بیورآکتور تصفیه‌خانه مورد تأکید است. در صورت تحقق ایده استقرار سیستم مدیریت انرژی در هوادهی بیورآکتور این طرح با هدف خط مبنای قابل پذیرش ۲/۵kgO2/kWh.، باعث بهبود شاخص راندمان اکسیژن‌دهی استاندارد (SAE(kgO2/kWh)) سیستم هوادهی مورد مطالعاتی در حدود ۹۲٪ می‌شود.



شکل۵. دیاگرام بلوکی استقرار سیستم مدیریت انرژی مورد مطالعاتی بر اساس تأمین خط مبنای بین‌المللی

بر اساس دیاگرام بلوکی شکل (۵) مبنی بر استقرار سیستم مدیریت انرژی در واحد هوادهی این تصفیه‌خانه، تحقق شاخص راندمان اکسیژن‌دهی استاندارد معادل ۲/۵ kgO2/kWh. موجب کاهش توان الکتریکی مصرفی در حدود ۲۷/۷٪ (معادل ۲۰۱kW) و کاهش کل بار الکتریکی مورد نیاز تجهیزات مورد مطالعاتی تا ۱۳۷۱kW (کاهش حدود ۱۲/۸٪) را در پی خواهد داشت، بر این اساس صرفه‌جویی مصرف انرژی روزانه معادل ۴۸۲۴kWh.، سالیانه ۱۷۶۰/۷۶MWh. و در طول عمر مفید تأسیسات تصفیه‌خانه حدود ۵۲۸۲۳MWh. قابل تحقق ارزیابی می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

۵. تحلیل نتایج استقرار سیستم مدیریت مصرف انرژی

به استناد اطلاعات ارائه شده در آخرین نسخه ترازنامه انرژی کشور (سال۱۳۹۴) متوسط راندمان نیروگاه‌های حرارتی کشور حدود ۳۷/۴٪ و میزان مصارف و تلفات شامل ۲/۸٪ مصرف داخلی نیروگاه‌ها، ۲٪/۹ تلفات انتقال و ۱۱/۹٪ تلفات توزیع و همچنین شاخص میانگین شاخص انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای بخش نیروگاهی کشور برابر ۱۸۰ گرم بر کیلو وات ساعت است، بر این اساس در طول عمر مفید تأسیسات صرفه‌جوئی ۱۷ میلیون متر مکعب گاز طبیعی و عدم انتشار ۹۵۰۰ تن گاز آلاینده و گلخانه‌ای از اثرات مثبت فنی و زیست محیطی طرح مورد نظر می‌باشد.

از دیدگاه صرف بنگاه اقتصادی در تحلیل مورد مطالعاتی حاضر، با توجه به تعرفه نازل هزینه برق مصرفی در دسته‌بندی گروه آب و کشاورزی و گروه تصفیه‌خانه‌ها و شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب شامل ۲۲۴Rials/kWh. هزینه انرژی و۱۸۰۰۵Rials/kW هزینه دیماند و در مجموع کل حدود ۳۲۰Rials/kWh.، اجرای طرح بهبود حاضر مبنی بر کاهش هزینه‌های سالیانه برق مصرفی در حدود ۵۶۴ میلیون ریال قابل تصور است.

همچنین از دیدگاه اقتصادی ملی نیز، با توجه به صرفه‌جوئی سالیانه ۵۷۱۶۷۵m^3N.G گاز طبیعی با امکان صادرات گاز طبیعی با تعرفه حدود €۳/۰/m^3N.G. و نیز عدم مصرف برق سالیانه ۱۷۶۰MWh. با اختلاف هزینه یکنواخت شده برق حدود ۲۱۸۰ Rials/kWh. ریال قابل تحقق می‌باشد. شایان ذکر است که در تحلیل حاضر منافع زیست محیطی ناشی از عدم انتشار ۹۴۰۰ تن گاز آلاینده و گلخانه‌ای نیز در عمر مفید تأسیسات لحاظ نشده است.

شایان ذکر است که با توجه به آمار ارائه شده در سال ۹۷ مبنی بر سهم میزان مصرف انرژی در تأسیسات تصفیه فاضلاب در حدود ۲۴۱ میلیون کیلووات، در صورت استقرار سیستم مدیریت انرژی با عملکرد مشابه نمونه مطالعاتی، هدف‌گذاری تحقق ۳۷ میلیون کیلو وات ساعت صرفه‌جوئی انرژی سالیانه دور از انتظار نمی‌باشد.

٦. تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله به جهت همکاری صمیمانه و بی دریغ مجموعه مدیران، کارشناسان و دست اندرکاران تصفیه خانه فاضلاب شهریار، مراتب احترام، تشکر و قدردانی خود را از بعمل می‌آورد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

منابع

[۱] تشیعی، حمیدرضا و سیستانا محمد قاسمی (۱۳۹۵)، *مدیریت مصرف انرژی در تأسیسات آب و فاضلاب*، انتشارات مکث نظرف شماره ملی کتاب شناسی ۴۲۸۸۲۷۶.

[۲] ثقفی، سحر؛ امینی راد، حسن؛ مهردادی، ناصر و غلامرضا نبی بید هندی (۱۳۹۵)، "تعیین انرژی الکتریکی مصرفی در فرآیندهای مختلف تصفیه فاضلاب صنعتی شهرک نصیرآباد با رویکرد مقدار حذف COD"، نشریه محیط شناسی / دوره ۴۲، شماره ۱، فصل بهار.

[۳] داوودی نژاد، مصطفی و پوریا بی پروا (۱۳۹۴)، "اولویت بندی فناوری‌های تولید انرزی از فرآیندهای تصفیه فاضلاب به روش تحلیل سلسله مراتبی AHP"، نشریه انرژی ایران / دوره ۱۸ شماره ۳.

[۴] سعیدی، محسن و مجید حسن‌زاده (۱۳۸۴)، "کمینه‌سازی مصرف آب و تولید پساب در صنایع با استفاده از روش برنامه ریزی خطی و غیر خطی"، نشریه انرژی ایران / سال ۹ام، شماره ۲۵ .

[۵] کریمی، عبدالرضا؛ مهردادی، ناصر؛ نبی بید هندی، غلامرضا و سید جمال‌الدین هاشمیان (۱۳۸۹)، "معیارهای انتخاب فرآیند بهینه تصفیه فاضلاب"، چهارمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران.

[۶] مهردادی، ناصر؛ آقایجانی یاسینی، آزاده؛ زاهدی مهر، علی؛ محمدی اقدم، علیرضا و غلامرضا نبی‌بیدهندی (۱۳۹۰)، "کاربرد امواج مافوق صوت بر محلول‌سازی (هیدرولیز) و بهبود قابلیت تجزیه بیولوژیکی ترکیبات آلی فاضلاب صنایع لبنی (مطالعه موردی صنایع لبنی پگاه)" ، مجله آب و فاضلاب، دوره ۲۲، صص ۷۰-۶۴.

[۷] مهردادی، ناصر؛ ترابیان، علی و احمد رضا محمدی (۱۳۹۱)، "کاهش لجن مازاد با استفاده از روش‌های مختلف در تصفیه بیولوژیکی فاضلاب به روش SBR"، نشریه محیط شناسی، سال ۳۸، شماره ۶۱، صص ۴۹-۶۰.

[8] Amand L. and Carlsson B. (2012), "*Optimal areation control in a nitrifying activated sludge process*" J Wtaer Research. 46(7), 2101-2110.

[9] Chae K. and J. Kang (2013), "*Estimating the Independence of Munciple Wastewater Treatment Plant Incorporating Green Energy Resource*". Energy Conservation and Managment. No. 75, pp. 664-672.

[10] Goldstein R. and W. Smith (2002), "*Water & Sustainability (volume 4): U.S. Electricity Consumption for Water Supply & Treatment - the Next half Century*," Electric Power Research Institute, United States of America.

[11] Kusiak A., Zhang Z. and Y. Zeng (2013), "*Modeling and Analises of pump in wastewater Treatment Plant: a Data-mining Approach*". Engineering Applicationa of Artifical Inetlligence. 26(7), pp. 1643-1651.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

[12] Malcoim B., Middleton R., Schulting F. and G. Wheale (2010), "*Energy Efficency in the water indusry, a Global Research Project*" J Wtaer and Technology. 6(2), pp. 208-205.

[13] Manual of Practice (2009), "*Energy Conservation in Water and Wastewater Facilities*" (MOP) No. 32. New York: McGraw Hill. WEF.

[14] Metcalf and Eddy Inc. (2014), "*Wastewater engineering; treatment, disposal, reuse.*" 5nd Ed. New York: McGraw-Hill. Chapter 7 pp. 555, 556 and 701

[15] U.S. Department of Energy. EERE. (1996). "Fact Sheet: Replacing an Oversized and Underloaded Electric Motor," DOE/GO-10096-287. Washington, DC:Energy Efficiency and Renewable Energy.

[16] Zhang Z., Kusiak A. and Y. Zeng (2012), "Minimizing pump Energy in a Wastewater Procecing Plant". Energy. 47(1), pp. 514- 550.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]