اولویت‌بندی فناوری‌های تولید انرژی از فرایندهای تصفیه فاضلاب به روش تحلیل سلسله مراتبی AHP

مصطفی داوودی نژاد[۱]، پوریا بی‌پروا[۲]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۹/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۳/۱

چکیده:

به‌منظور نیل به توسعه پایدار، در کنار پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و کاهش میزان مصرف انرژی، باید به دنبال راه‌هایی برای جبران تمام یا بخشی از انرژی مصرفی تأسیسات تصفیه فاضلاب از طریق استفاده از پتانسیل‌های فاضلاب‌ها برای تولید انرژی بود. در حال حاضر، تولید بیوگاز در رآکتورهای بی‌هوازی، کشت ریزجلبک و پیل‌های سوخت میکروبی از روش‌های شناخته‌شده تولید انرژی همزمان با تصفیه فاضلاب هستند. با توجه به تنوع پارامترهای تأثیرگذار در فرایندهای تولید انرژی از فاضلاب، انتخاب فرایند بهینه، پیچیده و مشکل است. اولین گام در این مقوله، شناخت معیارهای انتخاب و بررسی نحوه تأثیرگذاری آنها است. در این پژوهش، اولویت‌بندی و انتخاب بهترین گزینه برای تولید انرژی از فرایندهای تصفیه فاضلاب براساس معیارهای فنی، اقتصادی، مدیریتی و زیست محیطی به‌روش تحلیل سلسله مراتبی AHP و برمبنای نظرخواهی از کارشناسان و با تأکید ویژه بر زیرساخت‌های کشور انجام شد. در نهایت، روش تصفیه بی‌هوازی با وزن ۰/۵۴۰ به‌عنوان گزینه مناسب مشخص شد و روش تصفیه ریزجلبکی با وزن ۰/۳۳۰ و پیل سوخت میکروبی با وزن ۰/۱۳۰ در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند.

کلمات کلیدی:

رآکتور بی‌هوازی، ریزجلبک، پیل سوخت میکروبی، تحلیل سلسله مراتبی، انرژی

۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی شیمی (انرژی و محیط زیست)، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) m.davoudinejad@gmail.com
۲) دکتری شیمی (تجزیه)، استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری p.biparva@sanru.ir

مقدمه

گرچه هدف اصلی از تصفیه فاضلاب، حذف مؤثر آلاینده‌ها و رساندن مقادیر آنها به استانداردهای قانونی است، اما حجم زیاد فاضلاب‌های تولیدی در بخش‌های شهری و صنعتی و رشد روزافزون واحدهای تصفیه، سبب افزایش مصرف انرژی در تأسیسات فاضلاب شده است. در نتیجه، به‌منظور نیل به توسعه پایدار، در کنار پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و کاهش میزان مصرف انرژی، باید به دنبال راه‌هایی برای جبران تمام یا بخشی از این انرژی مصرفی از طریق استفاده از پتانسیل‌های فاضلاب برای تولید انرژی بود. گزینه‌های متعدد تولید انرژی از فرایندهای تصفیه فاضلاب، باید علاوه بر کارایی مطلوب در تصفیه فاضلاب، بازده مناسبی در تولید انرژی داشته باشند. در حال حاضر، تولید بیوگاز از تصفیه بی‌هوازی فاضلاب بیشترین کاربرد را دارد، اما روش‌های متنوعی وجود دارند که هم از نظر تصفیه فاضلاب و هم از نظر پتانسیل تولید انرژی نسبت به روش‌های سنتی مزیت‌هایی دارند و این امر انتخاب روش مطلوب برای تولید انرژی از فاضلاب را مشکل می‌سازد. سه روش عمده برای تولید انرژی به‌صورت همزمان با تصفیه فاضلاب وجود دارد که عبارتند از تصفیه بی‌هوازی (تولید بیوگاز)، تصفیه به کمک ریزجلبک‌ها و تصفیه در پیل سوخت میکروبی. این روش‌ها، ماهیت کاملا متفاوتی با یکدیگر دارند و از طرفی، از نظر رشد فناوری‌های وابسته و تجربه بکارگیری در یک سطح قرار ندارند به‌طوری که هضم بی‌هوازی فاضلاب‌ها (عمدتا صنعتی) سالیان دراز مورد استفاده قرار می‌گیرد در حالی که تصفیه فاضلاب با استفاده از ریزجلبک‌ها به‌تازگی در مقیاس‌های بزرگ اجرا شده است و پیل‌های سوخت میکروبی نیز تنها در پایلوت‌های آزمایشگاهی مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند.

روش‌های تولید انرژی از فاضلاب

۲-۱. تصفیه بی‌هوازی فاضلاب و تولید بیوگاز

تصفیه بی‌هوازی فاضلاب‌ها یک فرایند متان‌سازی است که علاوه بر کاهش در COD یا BOD پساب‌ها، با تولید متان یک منبع انرژی پاک محسوب می‌شود. تولید هر مول گاز متان معادل ۶۴ گرم BOD است [۲۰]. عوامل مؤثر بر تولید بیوگاز از پساب شامل مشخصات پساب مانند مواد مغذی، pH، ظرفیت بافری و پارامترهای بهره‌برداری از سیستم مثل دما، بار آلودگی و ترکیبات بازدارنده است. روش‌های تصفیه بی‌هوازی نسبت به روش‌های هوازی مزایایی دارد از جمله تولید لجن کمتر، نیاز به مواد مغذی کمتر، نیاز به راکتور کوچکتر، کاهش گازهای آلاینده، پاسخگویی سریع‌تر به افزایش سوبسترا بعد از زمان طولانی عدم تغذیه سیستم. اما این سیستم‌ها معایبی نیز دارند از قبیل زمان راه‌اندازی طولانی‌تر، نیاز به افزایش قلیائیت به سیستم، امکان نیاز به روش تصفیه هوازی در خروجی جهت رسیدن به پساب مطابق استانداردها، عدم امکان حذف نیتروژن و فسفر، اثر بیشتر کاهش دما در سرعت واکنش و امکان تولید بو و گازهای خورنده. لازم به ذکر

است که روش تصفیه بی‌هوازی به‌منظور تصفیه پساب‌های آلوده صنعتی که روش‌های هوازی قادر به تصفیه کامل آنها نیستند، به‌کار گرفته می‌شود و برای فاضلاب‌های شهری کاربرد چندانی ندارد.

پیل سوخت میکروبی

پیل‌های سوخت میکروبی مزایای عملکردی و بهره‌وری بیشتری نسبت به سایر فناوری‌های رایج بکاررفته از تولید انرژی توسط مواد آلی دارد که عبارتند از تبدیل مستقیم انرژی از سوبسترا به الکتریسیته با راندمان تبدیلی بالا، بهره‌وری در دمای محیط، عدم نیاز به دما و انرژی ورودی برای تهویه، دارا بودن کاربردهای گسترده در مکان‌های فاقد تأسیسات برقی و کار با سوخت‌های گوناگون [۱۷]. استفاده از سیستم‌های تصفیه MFC مزایایی چون صرفه‌جویی در مصرف انرژی، تولید انرژی و همچنین کاهش در میزان لجن تولیدی دارد. میکروارگانیسم‌های فعال در MFCها عمدتا میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی یا اختیاری هستند. درنتیجه، نیاز به هوادهی وجود ندارد. بعلاوه، بازده سلولی باکتری‌ها (۰/۱۶ gVSS/gCOD– ۰/۰۷) کمتر از باکتری‌های لجن فعال (۰/۴۵ gVSS/gCOD– ۰/۳۵) است، در نتیجه، تولید لجن به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. نتایج تحقیقات بسیاری در این زمینه نشان داده است که اگر میزان مصرف انرژی متوسط هوادهی فاضلاب‌ها معادل ۱ kWh/kg COD باشد، MFCها علاوه بر کاهش ۱۰۰ درصدی انرژی مورد نیاز برای هوادهی، توانایی تولید ۱۰ درصد انرژی اضافی (۰/۱ kWh/kg COD) را نیز دارند [۱۵]. درنتیجه، با درنظر گرفتن کاهش قابل توجه در تولید لجن (تا ۸۰ درصد) و متعاقبا مصارف انرژی سیستم‌های فرآوری لجن، می‌توان گفت که استفاده از فناوری پیل سوخت میکروبی می‌تواند تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را از منابع انرژی خارجی بی‌نیاز سازد.

کشت ریزجلبک و تولید بیودیزل

استفاده از ریزجلبک‌ها برای تصفیه پساب‌های شهری تاکنون موضوع بسیاری از مطالعات محققین بوده است. امروزه تصفیه زیستی با استفاده از جلبک‌ها کاربرد بسیاری دارد که شامل حذف مواد مغذی و ترکیبات آلی از پساب‌ها، جدا کردن زنوبیوتیک‌ها و ایجاد تبدیلات زیستی بر ساختار شیمیایی آنها، تعدیل پساب‌های اسیدی و حاوی فلزات سنگین، جدا کردن و جذب دی‌اکسید کربن و سنجش ترکیبات سمی توسط حسگرهای زیستی بر پایه سیستم‌های ریزجلبکی است. برخی از این کاربردها تجاری شده و برخی هنوز در مرحله تحقیقاتی قرار دارند. ادغام تصفیه فاضلاب با کشت جلبک به‌منظور تولید سوخت زیستی، راهکاری اقتصادی و محیط زیستی می‌باشد، زیرا در این روش مقدار زیادی آب و مواد مغذی (بخصوص نیتروژن و فسفر) تأمین می‌گردد [۲۷]. روش‌های معمول برای تصفیه فاضلاب مانند نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون توسط باکتری در نهایت نیتروژن را به‌صورت گاز نیتروژن (N_2) خارج می‌کنند، ولی در سیستم تصفیه فاضلاب برمبنای جلبک، نیتروژن به‌عنوان یک ترکیب سودمند در بیومس باقی می‌ماند. استفاده از ریزجلبک‌ها برای تصفیه فاضلاب به دلیل ساده‌سازی سیستم‌های تصفیه و در نتیجه، حذف مواد مورد نیاز و کاهش قابل توجه در انرژی مصرفی فرایند، با رشد روزافزونی روبروست. از مزایای بارز استفاده از ریزجلبک‌ها در تصفیه فاضلاب، عدم نیاز به هوادهی و حذف مؤثر مواد مغذی

(نیتروژن و فسفر) بدون نیاز به مراحل نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون می‌باشد. در حالی که روش‌های دیگر تولید انرژی از فرایندهای تصفیه فاضلاب، توانایی تأمین بخشی از مصارف انرژی سیستم تصفیه را دارا می‌باشند، تصفیه فاضلاب با استفاده از ریزجلبک‌ها، با کاهش قابل توجه انرژی مصرفی فرایند می‌تواند انرژی مازاد قابل ملاحظه‌ای نیز تولید کند. جدول (۱) برخی مزایا و معایب این سه روش تولید انرژی از فاضلاب را نشان می‌دهد.

جدول ۱) مزایا و معایب روش‌های مختلف تولید انرژی از فاضلاب.

مزایا	معایب
تصفیه بی‌هوازی (تولید بیوگاز)	
روش کارآمد برای تصفیه پساب‌های با بار آلودگی بالا تولید لجن کمتر نیاز به مواد مغذی کمتر نیاز به رآکتور کوچک‌تر روش کاملا شناخته‌شده	زمان راه‌اندازی طولانی نیاز به افزایش قلیائیت به سیستم امکان تولید بو و گازهای خورنده عدم امکان حذف نیتروژن و فسفر نیاز به روش هوازی برای تصفیه تکمیلی حساسیت بیشتر به دما نیاز به واحد تصفیه گازهای ترش همراه و رطوبت‌زدایی بیوگاز
پیل سوخت میکروبی	
تولید مستقیم الکتریسیته همزمان با تصفیه فاضلاب نیاز به اکسیژن‌رسانی کمتر در مقایسه با تصفیه هوازی عدم نیاز به هوادهی برای سیستم‌های هوا- کاتد کاهش حجم لجن تولیدی در مقایسه با تصفیه هوازی کار در دمای محیط امکان طراحی در مقیاس‌های کوچک انعطاف‌پذیری در برابر طراحی‌های مختلف کنترل بو	جدید بودن روش و کمبود اطلاعات طراحی در مقیاس‌های بزرگ حساسیت بالای سیستم و مشکل بودن کنترل آن نیاز به غشای تبادل پروتون و مشکل گرفتگی غشاء نیاز به مواد حد واسط اکسیداسیون و احیا
کشت ریزجلبک و تولید بیودیزل	
امکان تولید انرژی مازاد بر نیاز تصفیه‌خانه عدم نیاز به هوادهی به‌دلیل تولید اکسیژن براثر متابولیسم جلبکی امکان استفاده از تأسیسات تصفیه فاضلاب موجود برای کشت ریزجلبک حذف مؤثر آلاینده‌های آلی، نیتروژن و فسفر و فلزات سنگین امکان تولید بیودیزل، بیواتانول، بیوگاز، پروتئین و کود از میکروجلبک‌ها بازده بالای رشد و تولید بیودیزل با راندمان بالا در دسترس بودن روش‌های متعدد استخراج بیودیزل از میکروجلبک مصرف دی‌اکسید کربن توسط میکروجلبک کاهش ۷۸ درصدی تولید دی‌اکسید کربن در صورت استفاده از بیودیزل جلبکی همکاری و همزیستی میکروجلبک‌ها با باکتری‌ها در فرایند تصفیه	نیاز به کنترل عناصر غذایی و pH و جلوگیری از ورود ویروس‌ها و باکتری‌های مخرب نیاز به افزودن مواد مغذی در برخی موارد نیاز به نور مناسب برای انجام عمل متابولیسم نیاز به سیستم‌های جداسازی پرهزینه بیوروغن

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

روش‌شناسی

مدل تصمیم‌گیری تحلیل سلسله مراتبی، AHP

در سال ۱۹۷۰، مسائل انرژی به حالت تک‌معیاره و با هدف شناسایی کاراترین گزینه تأمین در کمترین هزینه مطرح شد. در سال ۱۹۸۰، رشد آگاهی‌ها و اطلاعات محیطی، چارچوب تصمیم‌گیری تک‌معیاری برای مسائل انرژی را تغییر داد و نیاز به ترکیب ملاحظات اجتماعی و زیست محیطی در برنامه‌ریزی انرژی، منجر به روی آوردن به استفاده از روش‌های چند معیاره شد [۱۹]. مدل‌های تصمیم‌گیری به دو دسته کلی مدل‌های چندهدفه معروف به MODM و مدل‌های چندشاخصه معروف به MADM[1] تقسیم می‌شود. از مدل‌های MODM به‌منظور طراحی و از مدل‌های MADM برای انتخاب گزینه برتر استفاده می‌شود [۱]. شاخص‌های موجود در یک مدل چندشاخصه می‌تواند فازی باشد. از این روش‌ها هنگامی استفاده می‌شود که اهداف یا معیارهای گوناگونی وجود دارند که تصمیم‌گیری باید با توجه به آنها انجام گیرد، نوع تصمیم‌گیری از حالت ساده تک‌معیاری خارج و به حوزه تصمیم‌گیری با چندین هدف وارد می‌شود. در ابتدای این روش باید معیارهای تحلیل و ارزیابی مشخص گردند. در این روش، ارزش گزینه‌ها به‌صورت ماتریس مقایسات زوجی، تحلیل شده و درنهایت رتبه‌بندی می‌شوند. تصمیم‌گیری چندمعیاره، برای انتخاب بهترین گزینه از بین گزینه‌های موجود با توجه به چندین شاخص تصمیم به کار می‌رود. فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره، اهداف، معیارها، گزینه‌ها، تبدیل مقیاس معیارها به واحدهای متناسب، تعیین وزن معیارها برای تعیین اهمیت نسبی آنها، انتخاب و کاربرد الگوریتم ریاضی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها و انتخاب گزینه برتر را تعریف می‌کند. فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل چهار مرحله اساسی است: ۱- شناسایی و ارزیابی، ۲- وزن‌دهی، ۳- انتخاب گزینه برتر با استفاده از یک روش MADM و ۴- تحلیل حساسیت و انتخاب گزینه نهایی.

برای تحلیل یک سیستم چندمعیاره باید عناصر آن را بخوبی شناخت و آنها را به‌طور دقیق تعریف کرد و سپس به مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل آن پرداخت. یکی از کارآمدترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری، فرایند تحلیل سلسله مراتبی[2]، AHP، است که براساس مقایسات زوجی بنا نهاده شده و امکان بررسی گزینه‌ها را بر اساس شاخص‌های مختلف به تصمیم‌گیران می‌دهد [۳]. تکنیک AHP یا فرایند تحلیل سلسله مراتبی در دهه ۱۹۷۰ توسط توماس ال ساعتی دانشمند عراقی‌الاصل آمریکایی طراحی شد. هدف از این روش، شناسایی گزینه برتر و همچنین تعیین رتبه گزینه‌ها با لحاظ نمودن هم‌زمان کلیه معیارهای تصمیم‌گیری می‌باشد [۲۲]. فرایند تحلیل سلسله مراتبی یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است، زیرا این تکنیک امکان فرموله کردن مساله به‌صورت سلسله مراتبی را فراهم می‌کند و همچنین امکان درنظر گرفتن معیارهای کمی و کیفی در مساله را داراست. این فرایند گزینه‌های مختلف را

1) Multi Attribute Decision Making
2) Analytical Hierarchy process

در تصمیم‌گیری دخالت داده و امکان تحلیل حساسیت روی معیارها و زیرمعیارها را دارد. علاوه‌بر این، برمبنای مقایسه زوجی بنا نهاده شده که قضاوت و محاسبات را تسهیل نموده و میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم را نشان می‌دهد که از مزایای ممتاز این تکنیک در تصمیم‌گیری چندمعیاره است [۵ و ۱۴]. در این تحلیل مفاهیم قابل تعریف است:

- گزینه: گزینه‌های مورد بررسی برای اولویت‌بندی و انتخاب؛
- معیار: ویژگی‌ها یا پارامترهای عملکردی که برای انتخاب گزینه‌های تصمیم‌گیری مطرح است. معیارها ممکن است کمی یا کیفی باشند و معیارهای کیفی ممکن است دارای مطلوبیت مثبت با مطلوبیت منفی باشند؛
- ماتریس تصمیم‌گیری: تصمیم‌گیری‌های چند معیاره معمولا توسط ماتریس تصمیم‌گیری فرمول‌بندی می‌شوند.

روش AHP شش گام زیر را شامل می‌گردد [۱۱]:

۱- تعریف مساله و بیان شفاف اهداف و نتایج مورد انتظار؛
۲- تبدیل مساله پیچیده به عناصر تصمیم‌گیری (بیان جزئیات معیارها و گزینه‌ها)؛
۳- بکارگیری مقایسات زوجی بین عناصر تصمیم‌گیری به منظور ایجاد ماتریس‌های مقایسه؛
۴- استفاده از روش بردار ویژه برای برآورد وزن‌های نسبی عناصر تصمیم‌گیری؛
۵- محاسبه نرخ ناسازگاری ماتریس‌ها برای اطمینان از سازگاری قضاوت‌های تصمیم‌گیرندگان؛
۶- تجمیع عناصر تصمیم وزن‌دهی‌شده برای به‌دست آوردن رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها.

به‌طور کلی، فرایند تصمیم‌گیری از لحاظ فضای تصمیم به دو دسته پیوسته و گسسته تقسیم می‌شود و تصمیم‌گیری در فضای گسسته به دو دسته تک‌معیاره و چندمعیاره تقسیم می‌شود. خود معیارها به سه دسته معیارهای کیفی، کمی و ترکیبی (کیفی و کمی) تقسیم می‌شوند. در مرحله اول باید عوامل مهم در تصمیم‌گیری را در قالب یک درخت تصمیم‌گیری به‌صورت سلسله مراتبی بیان کنیم. هر انتخاب بر اساس معیارهای مشخصی انجام می‌شود. هرکدام از این معیارها یا شاخص‌ها می‌تواند دارای زیرمعیارها یا زیر شاخص‌هایی باشد. در هر صورت، تکنیک AHP برای هرکدام از اجزای این درخت اعم از اینکه گزینه باشند یا معیار، امتیازی را به‌دست می‌آورد. در روش AHP برای هرکدام از گزینه‌ها یک امتیاز به‌دست می‌آوریم و گزینه‌ها برحسب امتیازی که کسب کرده‌اند، رتبه‌بندی می‌شوند. مسلما گزینه‌ای که بیشترین امتیاز را کسب کند، بهترین گزینه برای انتخاب شدن است. در AHP عناصر هر دسته نسبت به عنصر مربوط به خود در سطح بالاتر به‌صورت زوجی مقایسه شده و وزن آن‌ها محاسبه می‌گردد. این وزن‌ها، وزن نسبی نامیده می‌شود. با تلفیق این وزن‌های نسبی، وزن نهایی هر گزینه مشخص می‌شود. وزن‌دهی براساس مقایسه‌های زوجی انجام شده و تصمیم‌گیرنده‌ها از قضاوت‌های شفاهی برای وزن‌دهی استفاده می‌کنند به‌گونه‌ای که اگر عنصر i با عنصر j مقایسه شود، تصمیم‌گیرنده خواهد گفت که اهمیت i بر j کدام‌یک از حالت‌های جدول (۲) است.

جدول ۲) مقیاس ترجیحات بین دو عنصر برای مقایسه‌های زوجی

وزن‌های ترجیحی/ سطح اهمیت	تعریف	توضیحات
۱	ترجیح برابر	دو فعالیت مشارکت یکسانی نسبت به هدف دارند.
۳	ترجیح متوسط	تجربیات و قضاوت به‌طور ملایم یک فعالیت را به دیگر فعالیت‌ها ترجیح می‌دهد.
۵	ترجیح قوی	تجربیات و قضاوت به‌طور قوی یا ویژه، یک فعالیت را به دیگر فعالیت‌ها ترجیح می‌دهد.
۷	ترجیح خیلی قوی	یک فعالیت به‌طور خیلی قوی نسبت به دیگر فعالیت‌ها ترجیح داده می‌شود.
۹	ترجیح بی‌نهایت	ترجیح یک فعالیت نسبت به دیگر فعالیت‌ها در حداکثر درجه ممکن است.
۲ و ۴ و ۶ و ۸	مقادیر بینابینی	برای بیان ترجیحات بین مقادیر بالا است.
معکوس		معکوس هریک برای بیان مقایسات معکوس استفاده می‌شود.

در نظرات شفاهی که برای شاخص‌های کیفی به‌کار می‌روند، یک نکته را باید در نظر داشت. اگر اهمیت عنصر i بر j برابر با n باشد، اهمیت j بر i برابر با ۱/n است و با توجه به این نکته، کافی است در ماتریس مقایسه فقط مقادیر بالای قطر اصلی پر شود. مقادیر زیر قطر اصلی معکوس مقادیر بالای قطر خواهد بود. سه نوع ماتریس مقایسه زوجی وجود دارد:

۱. ماتریس نوع اول: ارزیابی میزان اهمیت معیارها نسبت به هدف؛
۲. ماتریس نوع دوم: ارزیابی میزان اهمیت زیرمعیارهای مربوط به هریک از معیارها نسبت به معیار مربوطه؛
۳. ماتریس نوع سوم: ارزیابی میزان اهمیت گزینه‌ها نسبت به معیارها و زیرمعیارها.

در سطح اول، اهمیت نسبی گزینه‌ها نسبت به یک معیار سنجیده شده و ماتریس‌های مقایسات زوجی استخراج می‌گردند. در سطح دوم اهمیت نسبی معیارها نسبت به سطح هدف سنجیده شده و ماتریس‌های مقایسات زوجی استخراج می‌گردند. لازم به ذکر است که در مورد معیارها باید به نوع آنها توجه شود. در مورد برخی از معیارها زیاد بودن آن و در مورد برخی از معیارها کم بودن آن مطلوب است. توجه به نوع معیار در روش محاسبه وزن آن اهمیت دارد. تعیین ماتریس تصمیم در AHP تنها در مورد معیارهای کیفی وابسته به نظر شفاهی و مقایسات زوجی تصمیم‌گیرنده است. حال اگر گروهی از تصمیم‌گیرندگان وجود داشته باشند که بخواهند در مورد گزینه‌ها نسبت به یک معیار کیفی نظر دهند، AHP این امکان را فراهم می‌کند که وزن نسبی گزینه را با استفاده از نظرات همه تصمیم‌گیرندگان محاسبه کنند. روند کار بدین صورت است که در تشکیل ماتریس مقایسات زوجی اگر تصمیم‌گیرندگان در یک مؤلفه ماتریس به توافق نرسند، هرکدام اهمیت وزنی مورد نظر خود را وارد می‌کند. مقدار نهایی، میانگین هندسی آنها خواهد بود. ممکن است اهمیت رأی تصمیم‌گیرندگان یکسان نباشد، در این حالت، گروه می‌تواند در ابتدای فرایند، اهمیت وزنی خود را تعیین کند.

شاخص‌های انتخاب فناوری تولید انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

از میان انواع گوناگون منابع تولید انرژی از فاضلاب، گزینه‌های قابل رقابت و محدودی را باید برگزید تا مقایسه مبنای منطقی داشته باشد. بعضی از عوامل و معیارها در تصمیم‌گیری، معیارهای بحرانی یا اصطلاحا معیارهای صفر و یک می‌باشند. به بیان دقیق‌تر، قبل از بررسی گزینه‌ها با دیگر معیارها، شایسته است گزینه‌ها با این معیارها چک شوند و در صورت مثبت بودن گزینه از نظر معیار بحرانی، به ادامه کار پرداخته شود. به‌طور مثال، میزان و بار آلودگی فاضلاب می‌تواند در این تصمیم‌گیری معیار بحرانی تلقی می‌گردد، زیرا انتخاب روش هوازی یا بی‌هوازی برای تصفیه این فاضلاب برمبنای بار آلودگی آن بر انتخاب روش تولید انرژی تأثیرگذار است. طبیعی است که این معیارها در مراحل بعد می‌توانند به‌عنوان معیارهای معمولی تلقی شده و گزینه‌ها نسبت به آنها سنجیده شوند، با این تفاوت که تمامی گزینه‌ها از حداقل لازم در این معیار برخوردار باشد. در اینجا قوت و ضعف گزینه‌ها با یکدیگر سنجیده می‌شود.

براساس اهداف متفاوتی که از مقایسه بین گزینه‌های گوناگون تولید انرژی می‌توان انتظار داشت، فهرست گزینه‌های شایسته مقایسه تغییر خواهد کرد. به‌عبارت دیگر، در برخی از موارد، گزینه‌هایی که عمر و تجربه بالاتری از نمونه‌های در مقیاس‌های کمتر دارند (به عنوان مثال، بیوگاز در مقابل پیل سوخت میکروبی) با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در نتیجه، مساله‌ای که در مقایسه فناوری‌ها بسیار مهم و حساس است، چرخه عمر فناوری‌های مورد مقایسه است. اهمیت این مطلب بدین لحاظ است که فناوری‌ها در بخش‌های مختلف چرخه عمر، ویژگی‌ها و شرایطی متفاوت دارند. از مهمترین این ویژگی‌ها، غیراقتصادی بودن فناوری‌های نوظهور (مرحله جنینی چرخه عمر) و قیمت بالای آنها نسبت به فناوری‌های مرسوم (مرحله رشد و بلوغ چرخه عمر) می‌باشد. لذا مقایسه فناوری‌های نوظهور با فناوری‌های مرسوم با معیارهای اقتصادی قطعا منجر به شکست فناوری‌های نوظهور خواهد شد. اما انجام یک مقایسه چندمعیاره که معیارهای مختلفی را علاوه بر معیار اقتصادی مدنظر قرار می‌دهد، می‌تواند تا حدودی در رقابت بین فناوری‌ها توازن برقرار کند [۴].

تنوع کمی و کیفی فاضلاب شهرها و مراکز صنعتی و تنوع روش‌های تصفیه بیولوژیکی فاضلاب اعم از روش‌های هوازی، بی‌هوازی و تلفیقی از این روش‌ها، امکان انتخاب فرایند بهینه تولید انرژی که اهداف مختلف از قبیل حداقل‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و نگهداری و ... را برآورده سازد، با مشکل مواجه می‌سازد. در این راستا، طراحان یا با استفاده از سیستم‌های پایلوت (معمولا پرهزینه و وقت‌گیر است) نسبت به انتخاب فناوری تولید انرژی اقدام می‌نمایند یا بر اساس مقایسه اقتصادی و کیفی فرآیندهای مختلف و بدون لحاظ تأثیر معیارهای مختلف، متناسب با وزن و اهمیت نسبی آنها، بر اساس قضاوت‌های کارشناسی فرایند بهینه را انتخاب می‌کنند [۲].

با توجه به تنوع پارامترهای تأثیرگذار در فرایندهای تولید انرژی از فاضلاب، انتخاب فرایند بهینه، پیچیده و مشکل است. اولین گام در این مقوله، شناخت معیارهای انتخاب و بررسی نحوه تأثیرگذاری آنهاست. معیارهای انتخاب شامل

هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، زمین مورد نیاز، کمیت و کیفیت فاضلاب ورودی، قابلیت اجرای فرایند، اطمینان از عملکرد دائمی سیستم، کارایی، وجود دانش تخصصی و تجربه مورد نیاز، وجود زیرساخت‌ها و ... می‌باشد که در قالب گروه‌های زیر قرار می‌گیرند.

معیارهای فنی

- مشخصات کمی و کیفی فاضلاب: شناخت وضعیت کمی و کیفی فاضلاب خام ورودی به تصفیه‌خانه دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. وجود مواد سمی، فلزات سنگین یا ترکیبات ویژه خطرناک در فاضلاب می‌تواند برخی سیستم‌های تصفیه و تولید انرژی را دچار اختلال کند.
- میزان و درجه آلودگی فاضلاب: شدت آلودگی فاضلاب عبارت از مقدار مواد آلی و معدنی قابل تجزیه و اکسیده شدن می‌باشد. هرچه مقدار این مواد زیادتر باشد، شدت آلودگی فاضلاب بیشتر است. در آزمایشگاه شدت آلودگی با تعیین BOD بیان می‌گردد. پارامتر BOD مهمترین مشخصه طراحی تصفیه‌خانه‌ها مخصوصا فرایندهای تصفیه بیولوژیکی است. با افزایش میزان BOD فاضلاب، در کنار افزایش هزینه‌های تصفیه، قابلیت آن برای تولید انرژی نیز افزایش می‌یابد.
- میزان لجن تولیدی: روش‌های مختلف تصفیه بیولوژیکی، مقادیر لجن متفاوتی تولید می‌کنند که در انتخاب نوع سیستم تولید انرژی می‌تواند تأثیرگذار باشد.
- توانایی در تصفیه فاضلاب تا حدود استاندارد: روش‌های تولید انرژی از فاضلاب یا لجن حاصل، نخست باید استانداردهای زیست محیطی مربوط به تصفیه فاضلاب و همچنین تثبیت لجن را برآورده سازند.
- قابلیت اجرای فرایند: قابلیت اجرای فرایند، براساس چرخه عمر فناوری، تجربیات گذشته، اطلاعات مربوط به واحدهای در حال کار، اطلاعات انتشاریافته، مطالعات پایلوت و ... ارزیابی می‌گردد.
- کارایی: توانایی و قابلیت روش در تولید انرژی به نسبت هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی می‌تواند عامل مهمی در انتخاب روش تولید انرژی باشد.

معیارهای اقتصادی

- هزینه‌های سرمایه‌ای: برای فراهم نمودن امکان مقایسه و ارزیابی سیستم‌های تولید انرژی از نظر هزینه‌های سرمایه‌ای، باید یکسان‌سازی نتایج براساس میزان انرژی تولیدی به واحد خوراک ورودی (COD فاضلاب یا وزن لجن) یا واحد هزینه انجام‌شده صورت گیرد.
- هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری: هزینه‌های جاری هر سیستم به‌صورت مجموع هزینه‌های تعمیر و نگهداری، انرژی مصرفی و نیروی انسانی محاسبه می‌گردد. به‌منظور فراهم نمودن امکان مقایسه واقعی، درنظر گرفتن این هزینه‌ها در چرخه عمر فرایند و انجام ارزیابی در دوره عمر مفید باید صورت پذیرد.

- زمین مورد نیاز: یکی از ملاحظات اساسی در انتخاب سیستم تولید انرژی از فاضلاب و لجن حاصل، میزان زمین قابل دسترس است.

معیارهای مدیریتی

- پیچیدگی راهبری فرایند: پیچیدگی فرایند در بهره‌برداری تحت شرایط معمول و اضطراری باید دیده شود. سطوح آموزش مورد نیاز بهره‌برداران سیستم باید مدنظر قرار گیرد.
- زمان راه‌اندازی؛
- وجود تجربه کاربرد فرایند.

معیارهای زیست محیطی

- تولید آلاینده‌های گازی مانند CO_2، NOx و Sox و ... ؛
- تولید بو و گازهای خورنده؛
- زیبایی منظر.

نتایج و بحث

در این پژوهش، تا حد امکان سعی شد مقایسات زوجی بر پایه اطلاعات کمی موجود از معیارهای فنی، اقتصادی، مدیریتی و زیست‌محیطی مانند حجم اولیه سرمایه‌گذاری، میزان انرژی تولیدی، کارایی تصفیه، کاهش تولید لجن، ابعاد واحد و ... انجام شود. جدول (۳) خصوصیات عمده روش‌های تولید انرژی از فاضلاب را نشان می‌دهد [۶–۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۶، ۱۸، ۲۱، ۲۳–۲۶]. با توجه به اینکه جز تصفیه بی‌هوازی، دو روش دیگر دارای سابقه کاربرد در داخل کشور نمی‌باشند، تعداد کارشناسانی که بر خصوصیات هر سه روش احاطه داشته باشند، بسیار اندک است. درنتیجه، به‌منظور امتیازدهی به معیارها و مقایسه آنها مصاحبه‌های حضوری با ۱۵ تن از کارشناسان آب و فاضلاب شاغل در بخش خصوصی و شرکت‌های آب و فاضلاب و اساتید دانشگاه انجام شد. قبل از انجام مصاحبه و تکمیل جداول مربوطه توسط متخصصین، ابتدا سندی شامل موضوع و هدف پژوهش و اطلاعات اولیه هریک از روش‌های تولید انرژی از فاضلاب، برای آنها ارسال شد و سپس طی مراجعه حضوری و بحث و تبادل نظر و رفع ابهامات پیرامون موضوعات، نسبت به تکمیل ماتریس‌های مقایسات اقدام شد.

با توجه به گزینه‌ها، معیارها و زیرمعیارهای مربوطه، ماتریس‌های مقایسه شامل پنج ماتریس مقایسه زوجی شامل یک ماتریس مقایسه معیارها نسبت به هدف و چهار ماتریس مقایسه و ارزیابی زیرمعیارها نسبت به هدف مربوطه و ۱۸ ماتریس مقایسه زوجی برای ارزیابی گزینه‌ها نسبت به زیرمعیارها بود. ماتریس‌های تکمیل‌شده برای معیارهای اصلی و

زیرمعیارها با استفاده از نرم افزار Expert Choice 11 محاسبه شده و وزن مربوط به هریک از معیارها و زیرمعیارها به‌دست آمد. جدول (۴) نتایج تحلیل سلسله مراتبی به‌صورت وزن نرمال معیارها و زیرمعیارها نشان داده شده است.

جدول ۳) مقایسه خصوصیات روش‌های تولید انرژی از فاضلاب

معیارها	تصفیه بی‌هوازی	پیل سوخت میکروبی	ریزجلبک
چرخه عمر فناوری	مرسوم	نوظهور	در حال رشد
کارایی حذف BOD	۹۰-٪۸۰<	٪۹۰<	٪۹۰<
نسبت لجن تولیدی*	۰/۱	۰/۲	۰/۴
نحوه تولید انرژی	غیرمستقیم (بیوگاز)	مستقیم؛ غیرمستقیم (بیوگاز)	غیرمستقیم (بیوگاز و بیوروغن)
انرژی خالص تولیدی**، kWh/kgCOD	۰/۰۴	۰/۱۰	۰/۴۶
هزینه سرمایه‌گذاری، $\$/kgCOD_{in}$	۰/۲۵	۱۰	۵/۵
هزینه عملیاتی، $\$/kgCOD_{in}$	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۳۵
تولید بو و گازهای خورنده	زیاد	کم	کم
انتشار دی‌اکسید کربن	زیاد	متوسط	ندارد
امکان حذف مواد مغذی	کم	متوسط	زیاد
توانایی حذف فلزات سنگین	ندارد	ندارد	دارد
زمان راه‌اندازی	طولانی	کوتاه	کوتاه
حساسیت دمایی	بالا	کم	تا حدودی
نیاز به تجهیزات الکترومکانیکی خاص	ندارد	دارد	تا حدودی
سابقه و تجربه کاربرد فرایند در داخل کشور	وجود دارد	وجود ندارد	وجود ندارد

* نسبت به روش تصفیه لجن فعال متعارف (هوازی).

**انرژی مازاد نیاز تصفیه‌خانه.

بر اساس نتایج، در بین معیارها، معیار فنی بیشترین امتیاز (۰/۵۲۴) را به‌دست آورد و به‌عنوان مؤثرترین معیار در تصمیم‌گیری و انتخاب فرایند مناسب تولید انرژی مشخص گردید. براساس نتایج حاصل، از میان شاخص‌های مربوط به کارایی فنی، چرخه عمر فناوری بیشترین اهمیت (۰/۳۹۹) را به‌خود اختصاص داد، زیرا هرچند فرایندی مانند پیل سوخت میکروبی در مقیاس آزمایشگاهی بازده بالایی در تولید انرژی و تصفیه فاضلاب داشته باشد، اما در صورت عدم امکان اجرای آن در مقیاس‌های کاربردی نمی‌تواند جزء گزینه‌های انتخابی باشد. پس از این معیار، کارایی فرایند در حذف آلاینده‌ها (BOD، فلزات سنگین و مواد مغذی) به‌عنوان مهم‌ترین شاخص برای تصمیم‌گیری بوده و پس از آنها کارایی تولید انرژی قرار دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که تصفیه مؤثر فاضلاب نسبت به تولید انرژی از آن در اولویت قرار دارد. معیار اقتصادی، دومین عامل تعیین‌کننده روش تولید انرژی و زیرمعیار هزینه سرمایه‌گذاری بیشترین وزن را در این معیار به خود اختصاص داده است. در معیار مدیریت، زیرمعیار «تجربه کاربرد فرایند» دارای بیشترین وزن است که اهمیت وجود

دانش و تجربه کافی برای اجرایی کردن یک روش تولید انرژی را نشان می‌دهد. در معیار زیست محیطی، میزان انتشار دی‌اکسید کربن مهم‌ترین شاخص شناخته شده است. وزن نسبی گزینه‌ها نسبت به معیارها و زیرمعیارها در جدول (۵) آمده است.

جدول ٤) وزن نرمال معیارها و زیرمعیارها در مقایسه روش‌های تولید انرژی از فاضلاب

معیارها	وزن نرمال	نرخ ناسازگاری	زیرمعیارها	وزن نرمال	نرخ ناسازگاری
فنی	۰/۵۲۴	۰/۰۸	انرژی خالص تولیدی	۰/۰۷۱	۰/۰۴
			نحوه تولید انرژی	۰/۰۳۴	۰/۰۱
			کارایی حذف BOD	۰/۱۴۴	۰/۱۰
			کارایی حذف مواد مغذی	۰/۱۳۶	۰/۰۵
			کارایی حذف فلزات سنگین	۰/۰۹۵	۰/۰۱
			تولید لجن	۰/۰۲۷	۰/۰۲
			ابعاد رآکتور	۰/۰۱۷	۰/۰۱
			عدم نیاز به تجهیزات الکترومکانیکی خاص	۰/۰۷۷	۰/۰۷
			چرخه عمر فناوری	۰/۳۹۹	۰/۱۰
مدیریتی	۰/۰۹۴	۰/۰۳	زمان راه‌اندازی	۰/۰۸۴	۰/۰۹
			سادگی راهبری	۰/۲۱۱	۰/۰۴
			تجربه کاربرد فرایند	۰/۷۰۵	۰/۰۶
اقتصادی	۰/۳۴۱	۰/۰۹	هزینه سرمایه‌گذاری	۰/۶۳۵	۰/۱۰
			هزینه عملیاتی	۰/۲۸۷	۰/۰۶
			زمین مورد نیاز	۰/۰۷۸	۰/۰۷
زیست محیطی	۰/۰۴۱	۰/۰۵	ایجاد بو و گازهای خورنده	۰/۲۷۸	۰/۱۰
			انتشار دی‌اکسید کربن	۰/۶۶۳	۰/۰۵
			زیبایی منظر	۰/۰۵۸	۰/۰۸

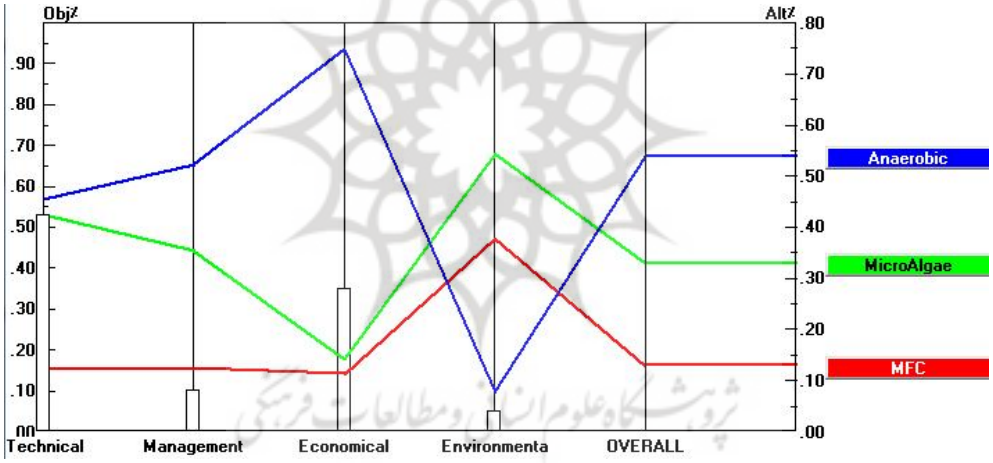
نتایج نشان می‌دهد که در حال حاضر از نظر معیارهای فنی، مدیریتی و اقتصادی، روش تصفیه بی‌هوازی و از نظر معیار زیست محیطی، روش تصفیه ریزجلبکی دارای ارجحیت می‌باشد. در نهایت، روش تصفیه بی‌هوازی با وزن ۰/۵۴۰ به‌عنوان گزینه مناسب مشخص شد و روش تصفیه ریزجلبکی با وزن ۰/۳۳۰ و پیل سوخت میکروبی با وزن ۰/۱۳۰ در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند.

جدول ۵) وزن نسبی گزینه‌ها نسبت به معیارها و زیرمعیارها در مقایسه روش‌های تولید انرژی از پساب صنعتی

معیار و زیرمعیارها	تصفیه بی‌هوازی	پیل سوخت میکروبی	ریزجلبک
معیار فنی	**۰/٤٥٤**	**۰/۱۲۲**	**۰/٤۲٤**
انرژی خالص تولیدی	۰/۰۷۵	۰/۱۸۳	۰/۷۴۲
نحوه تولید انرژی	۰/۰۸۸	۰/۶۶۹	۰/۲۴۳
کارایی حذف BOD	۰/۲۹۷	۰/۱۶۳	۰/۵۴۰
کارایی حذف مواد مغذی	۰/۱۶۲	۰/۰۶۸	۰/۷۷۰
کارایی حذف فلزات سنگین	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۷۷۸
تولید لجن	۰/۶۵۵	۰/۲۵۰	۰/۰۹۵
ابعاد رآکتور	۰/۶۶۹	۰/۲۴۳	۰/۰۸۸
عدم نیاز به تجهیزات الکترومکانیکی خاص	۰/۶۵۳	۰/۰۶۲	۰/۲۸۵
چرخه عمر فناوری	۰/۷۳۵	۰/۰۵۸	۰/۲۰۷
معیار مدیریتی	**۰/۵۲۲**	**۰/۱۲۵**	**۰/۳۵۳**
زمان راه‌اندازی	۰/۰۶۳	۰/۳۰۴	۰/۶۳۳
سادگی راهبری	۰/۱۰۵	۰/۲۵۸	۰/۶۳۷
تجربه کاربرد فرایند	۰/۷۲۸	۰/۰۵۴	۰/۲۱۸
معیار اقتصادی	**۰/۷٤۸**	**۰/۱۱۳**	**۰/۱٤۰**
هزینه سرمایه‌گذاری	۰/۷۶۳	۰/۰۶۱	۰/۱۷۶
هزینه عملیاتی	۰/۷۳۱	۰/۱۸۸	۰/۰۸۱
زمین مورد نیاز	۰/۶۹۶	۰/۲۲۹	۰/۰۷۵
معیار زیست محیطی	**۰/۰۷۷**	**۰/۳۸۰**	**۰/۵٤٤**
ایجاد بو و گازهای خورنده	۰/۰۶۹	۰/۶۸۷	۰/۲۴۴
انتشار دی‌اکسید کربن	۰/۰۶۶	۰/۲۱۷	۰/۷۱۷
زیبایی منظر	۰/۲۲۶	۰/۶۷۴	۰/۱۰۱

به‌ازای هر ماتریس تشکیل‌شده در این مقایسه، یک نرخ ناسازگاری توسط نرم‌افزار برای نشان دادن میزان دقت امتیازدهی به معیارها محاسبه می‌شود. درواقع، نرخ ناسازگاری ابزاری است که سازگاری را مشخص می‌کند و نشان می‌دهد که تا چه حد می‌توان به اولویت‌های حاصل از مقایسه‌ها اعتماد کرد. تجربه نشان داده است که اگر نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱۰ باشد، مقایسه‌های انجام شده قابل قبول است. بنابر این، مقایسه‌هایی که دارای نرخ ناسازگاری بالا باشند، باید مورد تجدیدنظر قرار گرفته و یا حذف شوند. اصولا مقایسه‌هایی مبنای کار قرار می‌گیرند که نرخ ناسازگاری پایینی داشته باشد. همان‌طور که در جدول (۴) نشان داده شده است، تمامی نرخ‌های ناسازگاری زیر ۰/۱ می‌باشد.

میزان حساسیت هریک از این روش‌ها نسبت به معیارهای اصلی در شکل (۱) نشان داده شده است. حساسیت عملکرد گزینه‌ها نسبت به معیارهای سنجش نشان می‌دهد که تصفیه بی‌هوازی فاضلاب از نظر معیارهای فنی، اقتصادی و مدیریتی و روش کشت ریزجلبک از نظر معیار زیست محیطی نسبت به روش‌های دیگر برتری دارند. روش پیل سوخت میکروبی در هیچ‌کدام از معیارها برتری نسبت به دو گزینه دیگر ندارد. پیل سوخت میکروبی علیرغم نقاط قوت بسیار، به دلیل گران بودن غشاهای مورد استفاده و نبود تجربه عملیاتی در مقیاس‌های بزرگ هنوز توان رقابت با روش‌های تولید انرژی دیگر را ندارد. روش تصفیه ریزجلبکی به‌دلیل پتانسیل بالای تولید انرژی و توانایی زیاد در حذف مواد مغذی و فلزات سنگین، پتانسیل کاربردی زیادی دارد و به نظر می‌رسد که در آینده نزدیک می‌تواند در بسیاری از موارد جایگزین روش تصفیه بی‌هوازی گردد.



شکل ۱) نمودار حساسیت گزینه‌های تولید انرژی از فاضلاب نسبت به معیارهای اصلی

منابع

[۱] اصغرپور، محمدجواد، (۱۳۷۷)، تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، انتشارات دانشگاه تهران.

[۲] کریمی، عبدالرضا، مهردادی، ناصر، هاشمیان، سیدجمال‌الدین و نبی بیدهندی، غلامرضا، (۱۳۸۹)، معیارهای انتخاب فرآیند بهینه تصفیه فاضلاب، چهارمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران.

[۳] میرزایی، مریم و باقری‌نژاد، جعفر، (۱۳۹۱)، ارائه مدل سلسله مراتبی برای اولویت‌بندی انرژی‌های تجدیدپذیر به کمک روش Fuzzy-AHP، دومین کنفرانس برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، تهران.

[۴] هاشمی، سیدجلال، باقری‌مقدم، ناصر و رضایی، مسعود، (۱۳۸۵)، ارزیابی فناوری سیستم‌های تولید انرژی الکتریکی غیرمتمرکز با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه، اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی، تهران.

[5] Bamdad N, Mohammadzadeh-Basir H, Narvankuhi A, Emami S, Saiedi A., (2007) "*Site selection methodology for industries*", Rahshah and Associates Engineers; 94:54-5.

[6] Beal Colin M., Ashlynn S. Stillwell, Carey W. King, Stuart M. Cohen, Halil Berberoglu, Rajendra P. Bhattarai, Rhykka L. Connelly1, Michael E. Webber, Robert E. Hebner, (2012) "Energy Return on Investment for Algal Biofuel Production Coupled with Wastewater Treatment", Water Environment Research, Volume 84, Number 9.

[7] Chan Yi Jing, Mei Fong Chong, Chung Lim Law, D.G. Hassell, (2009) "A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater", Chemical Engineering Journal 155: 1-18.

[8] Eric A. Zielke, (2006) "*Application of Microbial Fuel Cell technology for a Waste Water Treatment Alternative*", Microbial Fuel Cell technology, February 15.

[9] Gašpariková E., Kapusta Š., Bodík I., Derco J., Kratochvíl K., (2005) "Evaluation of Anaerobic-Aerobic Wastewater Treatment Plant Operations", Polish Journal of Environmental Studies Vol. 14, No. 1, 29-34.

[10] Ghangrekar, M. M. and Shinde V.B., (2006) "Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cell and Electricity Generation: A Sustainable Approach", 12th international sustainable development research conference, Hong Kong.

[11] Guangming Z, Ru J, Guohe H, Min X, Jianbing L., (2007) "*Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis*", Environmental Management; 82: 250 -259.

[12] Helble A. and Christian H , (2008) "Comparing aerobic and anaerobic wastewater treatment processes for papermill effluent considering new developments", Presentation ZELCHEMING General Meeting, Wiesbaden.

[13] Jang J.K., Pham T.H., Chang I.S., Kang K.H., Moon H, Cho K.S., Kim B.H., (2004) "Construction and operation of a novel mediator-and membrane-less microbial fuel cell", Process Biochem. 39:1007-1012.

[14] Karimi A, Mehrdadi N, Hashemian J, Nabi Bidhendi G R, Tavakkoli-Moghaddam R., (2010) "*Investigation of wastewater treatment plants of Iran s industrial estates and proposed a suitable model for optimum wastewater treatment process selection*", Thesis for degree of PhD in Environmental Engineering. Tehran University, Faculty of Environment. 56-61.

[15] Logan BE, (2008) "*Microbial fuel cells*". John Wiley and Sons Inc, Hoboken, New Jersey, USA.

[16] Lundquist T.J., Woertz I.C., Quinn N.W.T and Benemann J.R., (2010) "A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production", Energy Biosciences Institute, University of California Berkeley.

[17] Mathuriya AS and Sharma VN, (2009) "*Bioelectricity production from paper industry waste using a microbial fuel cell by Clostridium species"*. J Biochem Tech 1(2):49-52.

[18] Mrowiec B., Suschka J., (2010) "Anaerobic Wastewater Treatment Process", University of Bielsko-Biala, Willowa 2 Street, Bielsko-Biala 43-309, Poland.

[19] Pohekar SD, Ramachandran M., (2004) "*Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning e a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*"; 8:365e81.

[20] Rittman, B. E., McCarty P.L., (2001) "*Environmental Biotechnology: Principles and Applications"*, McGraw-Hill.

[21] Rozendal Rene A., Hamelers Hubertus V.M., (2008) "Korneel Rabaey, Jurg Keller and Cees J.N. Buisman, Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment", Trends in Biotechnology Vol.26 No.8.

[22] Saaty TL., (1997) "*A scaling method for priorities in hierarchical structures. Mathematical Psychology"*; 15(3):234-281.

[23] Satyam S. R., Behera M., Ghangrekar M. M., (2011) "Performance and economics of low cost clay cylinder microbial fuel cell for wastewater treatment", World Renewable Energy Congress, Linkoping, Sweden.

[24] Sharon B. Velasquez-Orta, Tom P. Curtis, Bruce E. Logan, (2009) "Energy From Algae Using Microbial Fuel Cells", Biotechnology and Bioengineering, Vol. 103, No. 6.

[25] Tyler Huggins, Paul H Fallgren, Song Jin and Zhiyong Jason Ren, (2013) "Energy and Performance Comparison of Microbial Fuel Cell and Conventional Aeration Treating of Wastewater", Huggins et al., J Microbial Biochem Technol S6.

[26] You S. J., Zhao Q. L., Jiang J. Q., and Zhang J. N., (2006)"*Treatment of Domestic Wastewater with Simultaneous Electricity Generation in Microbial Fuel Cell under Continuous Operation*", Chem. Biochem. Eng. Q., 20 (4) 407-412.

[27] Zhou W. et al, (2011) "*Local bioprospecting for high-lipid producing microalgal strains to be grown on concentrated municipal wastewater for biofuel production*", Bioresearch Technology.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی