Economical Optimization of Activated Sludge

Rakhshandehroo, G.R.
Assist. Prof. of Civil Eng. Dept., Shiraz Uuniversity, Shiraz, IRAN
Golkari, M.
Lecturer, Azad University of Estahban, Estahban, IRAN
Taj, S.S.
Graduate Student, Civil Eng. Dept., Shiraz University, Shiraz, IRAN

Abstract

In the past years, environmental pollution brought about due to the disposal of different wastes such as municipal, industrial, and agricultural wastes in Iran has converted the treatment and control of these contaminants to an important priority in protection, management, and planning of the environment. In this regard, authorities in the country have imported a variety of technologies for wastewater treatment systems including activated sludge system. Although there exists many references for design of such systems and a good progress in this regard has been made, but lack of experience and / or knowledge in construction, operation, and maintenance of treatment systems in addition to their high cost is still a dilemma that makes it very difficult to select a suitable system. Therefore, in order to save time and capital, it is necessary and inevitable to optimize the common wastewater treatment systems in Iran, specially activated sludge from an economical perspective.

In this paper, the activated sludge system for treatment of municipal wastewater has been optimized using a dynamic computer program such that the special intorrolation of different stages in the system can be properly modeled in this program construction, operation, maintenance, and repair costs of different units in an activated sludge treatment system have been evaluated using civil, mechanical, electrical, and construction plants for every structure and available standard charts and tables in the literature. Optimization has been performed with different combinations of the distinet units in the system. At the end, considering the increasing investment of the country in wastewater treatment plants and the need for economical considerations, complexities are investigated, explanations are presented, and some recommendations are made in that regard.

بهینه‌یابی اقتصادی سیستم لجن فعال

غلامرضا رخشنده‌رو* مرتضی گلکاری** سید سعید تاج***

چکیده

در سال‌های گذشته آلودگی‌های ناشی از دفع انواع فاضلاب اعم از خانگی، صنعتی، کشاورزی و غیره در کشورمان موجب شده است تا تصفیه و کنترل این آلاینده‌ها از اولویت‌های مهم حفاظت، مدیریت و برنامه‌ریزی محیط زیست باشد. در همین راستا مسئولان امر مبادرت به وارد کردن تکنولوژی روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب و از جمله سیستم لجن فعال به کشور نموده‌اند. هر چند که امروزه در خصوص طراحی این سیستم‌ها با توجه به در دسترس بودن منابع مختلف پیشرفت‌های خوبی حاصل شده است، اما کمبود تجربه و عدم آشنایی کافی به مسائل اجرایی، راهبری و نگهداری سیستم‌های تصفیه و هزینه‌های گزاف مورد نیاز معضلی است که انتخاب آنها را عمدتا" با دشواری همراه ساخته است. بنابراین برای جلوگیری از به هدر رفتن وقت و سرمایه بهینه‌یابی اقتصادی سیستم‌های رایج تصفیه فاضلاب در ایران و علی‌الخصوص لجن فعال موضوعی ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

در این مقاله بهینه‌یابی اقتصادی سیستم لجن فعال با استفاده از یک برنامه کامپیوتری دینامیکی انجام گرفته است تا بتوان چند مرحله‌ای بودن این سیستم و ساختار خاص ارتباطی بین این مراحل را مدل نمود. در این برنامه کامپیوتری هزینه های اجرایی، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیر واحدهای مختلف یک تصفیه‌خانه فاضلاب با سیستم لجن فعال با توجه به نقشه‌های اجرایی آن و همچنین با استفاده از نمودارها، آمار و ارقام بین‌المللی موجود ارزیابی گردیده است. سپس بهینه‌یابی اقتصادی با در نظر گرفتن ترکیب‌های گوناگونی از واحدهای مختلف این سیستم صورت پذیرفته است. در انتها با توجه به سرمایه‌گذاری‌های کلان کشور در امر تصفیه فاضلاب و لزوم صرفه‌جویی اقتصادی در این زمینه، پس از بررسی مشکلات، راه‌کارها و پیشنهاداتی مطرح شده است.

مقدمه

بشر در طی قرون متمادی فضولات ناشی از فعالیت‌های مختلف خود را (اعم از مسکونی، تجاری، صنعتی و ...) چه به صورت جامد و چه به صورت مایع به محیط زیست اطرافش دفع کرده است. این امر را باید ناشی از در دسترس بودن سطوح وسیع و کافی برای دفع زمینی فاضلاب تصفیه نشده و یا وفور آب‌های پذیرنده دانست که با توجه به میزان کم فاضلاب، این سطوح و آب‌های پذیرنده قادر به پالایش طبیعی فاضلاب (خودپالایی) بوده‌اند. اما این روند به دلیل رشد سریع جمعیت، توسعه شهرنشینی، صنعتی شدن، مکانیزه شدن کشاورزی و افزایش مقدار فاضلاب از لحاظ کمی و بالا بودن میزان آلودگی از لحاظ کیفی باعث تخریب محیط زیست و به مخاطره افتادن منابع طبیعی گردید. این موضوع سبب شد که تقاضا برای اعمال روش‌های کارآمدتر در کنترل و تصفیه فاضلاب رشد فزاینده‌ای پیدا کند. این امر محققان را بر آن داشت که سیستم‌هایی را در جهت به حداقل رساندن آلودگی‌های محیط زیستی طراحی نمایند که از پیامدهای آن به وجود آمدن انواع سیستم‌های تصفیه فاضلاب بوده است.

سیستم‌های تصفیه فاضلاب بر حسب نوع عملکرد و راندمان تصفیه به انواع گوناگونی تقسیم‌بندی می‌شوند. طبیعتا" به کارگیری هر کدام از سیستم‌های تصفیه فاضلاب تابع مقررات کشوری و محلی، قابلیت اجرا (با توجه به خصوصیات فناوری، اجتماعی، فرهنگی و ... محل)، نیروی انسانی متخصص و میزان تصفیه مورد نیاز، نحوه استفاده از پساب حاصل از تصفیه و ... می‌باشد. سیستم تصفیه فاضلاب مناسب برای استفاده در یک

* استادیار بخش مهندسی راه و ساختمان- دانشکده مهندسی - دانشگاه شیراز
** کارشناس ارشد مهندسی راه و ساختمان - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد استهبان
*** دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی راه و ساختمان - دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز

موقعیت معین آن است که این تنگناها را مورد توجه قرار داده و تصفیه‌خانه‌ای ارائه کند که هزینه کلی آن حداقل بوده و قابلیت رسیدن به راندمان مورد نظر را در بیشتر روش‌های وابسته داشته باشد. سیستم تصفیه فاضلاب بررسی شده در این مقاله لجن فعال می‌باشد که به علت مقبولیت و عمومیت به کارگیری برای تصفیه فاضلاب در ایران با جزییات واحدهای مربوطه‌اش مورد بررسی قرار گرفته است.

فرایند لجن فعال در سال ۱۹۱٤ و در انگلستان توسط آردن و لاکت[1] ارائه گردید [۱۱]. علت نامگذاری آن به این اسم استفاده از یک توده فعال از میکروارگانیسم‌هایی است که قادرند فاضلاب را به صورت هوازی تثبیت کنند. برای انجام این فرایند، واحدها، تأسیسات و تجهیزات مختلفی مورد نیاز است که به عنوان مثال می‌توان از واحدهای آشغال‌گیری، دانه‌گیری ، ته‌نشینی اولیه، حوض هوادهی، ته‌نشینی ثانویه ، تانک تغلیظ لجن و هاضم‌ها نام برد. این واحدها، به همراه تجهیزات و تأسیسات مربوطه، هزینه‌های قابل توجهی از لحاظ سرمایه‌گذاری اولیه جهت ساخت، نصب و راه‌اندازی و در ادامه هزینه‌های سالیانه بالایی جهت راهبری و نگهداری سیستم را می‌طلبند (والتر و همکاران ۱۹٦۲).

از پارامترهای مهم در انتخاب نوع سیستم تصفیه، پارامترهای اقتصادی می‌باشند. پارامترهای اقتصادی مهمی که چگونگی انتخاب و به کارگیری سیستم‌های تصفیه فاضلاب را تحت‌الشعاع خود قرار می‌دهند شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سازه‌ای، تجهیزات و تأسیسات مختلف برقی، شیمیایی، مکانیکی و ... (اعم از ریالی و ارزی)، هزینه سالیانه بهره‌برداری و نگهداری و هزینه تأمین مواد مصرفی می‌باشند. در کشورهای در حال توسعه (و از جمله در کشور ما) با توجه به نیاز سیستم‌های تصفیه فاضلاب به تجهیزات و فناوری خارجی و تغییرات و نوسانات نرخ ارز لازم است طراحی این سیستم‌ها به گونه‌ای انجام پذیرد که در عین برآورده ساختن کیفیت مورد نظر پساب خروجی، حداقل هزینه را نیز به همراه داشته باشد. با توجه به تنوع واحدها و هزینه‌های مربوطه در سیستم‌های تصفیه فاضلاب، محققان درصدد تهیه و تنظیم برنامه‌های کامپیوتری برآمدند که با الهام از مدل‌های ریاضی بتوانند ضمن بهینه‌یابی اقتصادی پروژه، به اصول طراحی بهینه سیستم‌های تصفیه دست یابند [۲]. این برنامه‌ها به دلایل مختلف در عمل زیاد موفق نبودند و به همین علت نیاز به طراحی مدلی که قادر باشد با به کارگیری فرایندی سیستماتیک، ترکیبی از تصمیمات متوالی را تعیین کرده و به حداکثر شدن کارآیی کلی سیستم منتهی گردد، احساس گردید که این امر منجر به ارائه برنامه‌ریزی پویا شد[۱۲ و ٤].

از آنجا که روابط حاکم بر سیستم تصفیه فاضلاب به طور منطقی و تجربی غیر خطی می‌باشند استفاده از برنامه‌ریزی پویا به دلیل ساختار آن مورد توجه قرار گرفت و کارآمد بودن آن توسط ایونسون و همکاران (۱۹٦۹)چیا و دفیلیپی (۱۹۷۰) به اثبات رسید [۲]. برنامه‌ریزی پویا یک فن محاسباتی است که بر اساس اصل بهینه‌گی بلمن[2] پایه‌ریزی شده است. [۹]. بر اساس اصلی بهینه‌گی بلمن خط مشی بهینه که شامل مجموعه‌ای از تصمیم‌گیری‌هاست، این ویژگی را دارد که وضعیت و تصمیم‌گیری‌های ابتدایی هر چه باشند، تصمیم‌گیری‌های باقی‌مانده باید خط مشی بهینه را، با توجه به وضعیت حاصل از تصمیمات قبلی تشکیل دهند. برنامه‌ریزی پویا بر این اصل استوار است. در بسیاری از مسائلی که در آنها رشته‌ای از تصمیم‌های مرتبط با یکدیگر مطرح می‌باشد، غالبا" از برنامه‌ریزی پویا که ماهیتا" روشی ریاضی است استفاده می‌شود. دلیل آن این است که برای هر سیستم، شبکه‌ای بر اساس نوع ارتباط بین مراحل آن تعریف می‌شود که با حل این شبکه از طریق برنامه‌ریزی پویا می‌توان مقدار بهینه را در طی مراحل گوناگون تعیین نمود.

کارهای قابل ملاحظه‌ای به منظور حداقل ساختن هزینه سیستم‌های تصفیه فاضلاب به روش کامپیوتری برنامه‌ریزی پویا در دنیا انجام شده است [٤،۱۲،۱۳،۳،۵].

در این مقاله به بررسی یکی از سیستم‌های رایج تصفیه فاضلاب در ایران (لجن فعال) ، ارائه تابع هزینه برای انواع مختلفی از هر یک از واحدهای آن، و

[1] Arden & Lockett

[2] Bellman

بهینه‌یابی کامپیوتری این سیستم (با تأکید بر جنبه‌های اقتصادی) پرداخته شده است. در تعیین توابع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سازه‌ای، تجهیزات و تأسیسات مختلف و هزینه سالیانه بهره‌برداری و نگهداری از جداول و منحنی‌های موجود در مراجع معتبر و همچنین برآورد هزینه تصفیه‌خانه‌های طراحی شده در کشور استفاده شده است. این توابع بر حسب پارامترهای طراحی برای واحدهای کلیدی تصفیه‌خانه به صورت نمودارهایی ارائه گردیده‌اند. بهینه‌یابی اقتصادی یک سیستم تصفیه فاضلاب می‌تواند به کمک یک مدل کامپیوتری به روش برنامه‌ریزی پویا و با استفاده از این توابع و نمودارها انجام گردد. به عنوان یک مثال حل شده هزینه‌های مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب شهر شیراز ارائه گردیده و بهینه‌یابی اقتصادی در این تصفیه‌خانه خاص بحث و بررسی شده است. در انتها با توجه به سرمایه‌گذاری‌های کلان کشور در امر تصفیه فاضلاب و لزوم صرفه‌جویی اقتصادی در این زمینه، راه‌کارها و پیشنهاداتی مطرح شده است.

روش تعیین توابع هزینهٔ واحدها

همان طور که بیان گردید جهت بهینه‌یابی یک سیستم تصفیه فاضلاب با گزینه‌های مختلف لازم است ابتدا هزینه هر یک از واحدها اعم از ساختمانی، تأسیساتی، راهبری و نگهداری و ... محاسبه گردد. در این ارتباط، شکل کلی توابع هزینه با استفاده از جداول و روابط موجود در مراجع معتبر به صورت یک تابع نهایی ($Y=nX^b$) با دو ضریب‌ثابت کالیبراسیون(b, a) در نظر گرفته شد [۱] و [۱۰ و ۷]. در این توابع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بر حسب دبی طراحی تصفیه‌خانه و سایر پارامترهای طراحی هر واحد و هزینه سالیانه بهره‌برداری و نگهداری در حدود ۲ الی ٤ درصد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه داده شده است. برای تطابق این توابع با شرایط ایران، علاوه بر هزینه‌ها و پارامترهای طراحی مختلف نسبت ضرایب ثابت این توابع نیز بررسی گردید.

جهت کالیبراسیون توابع هزینه با توجه به شرایط ایران اطلاعات هزینه‌ای مربوط به تصفیه‌خانه‌های طراحی شده فاضلاب شهرهای مختلف از جمله شیراز، رشت، لاهیجان، قزوین و گیلان‌غرب جمع‌آوری گردید. پس از بررسی اسناد و مدارک برآورد هزینهٔ این تصفیه‌خانه‌ها مشخص گردید که یک ارتباط منطقی بین دبی‌های طراحی و برآوردهای هزینه انجام شده برقرار نبوده است. به عنوان نمونه، تصفیه‌خانه شیراز با دبی طراحی بیشتر (۹٤۰ لیتر بر ثانیه) و برآورد انجام شده بر اساس فهرست بهای ۷۹، هزینه کمتری را نسبت به برآورد انجام شده برای دو تصفیه‌خانه رشت و لاهیجان با دبی طراحی کمتر (به ترتیب ۷۳۰ و ۳۰۰ لیتر بر ثانیه) بر اساس فهرست بهای ۷۷، داشته است. از یک دیدگاه مدیریتی یکی از علت‌های عدم وجود هماهنگی در برآورد هزینه تصفیه‌خانه‌های مختلف کشور با دبی های طراحی آنها را می‌توان در عمر کوتاهی دانست که از تشکیل مدیریت واحد و نظارت هماهنگ و همه جانبه بر صنعت آب و فاضلاب کشور (در قالب شرکت‌های آبفا) می‌گذرد. تجربه اندک تصفیه‌خانه های اجرا شده، عدم وجود بانک اطلاعاتی منسجم در این زمینه، و بالاخره وجود مشاورهای مختلف در طراحی این تصفیه‌خانه‌ها از عوامل دیگر این عدم هماهنگی است. در این مقاله ، توابع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بر اساس برآورد هزینه تصفیه‌خانه شیراز با لحاظ نمودن یک‌سری فرضیات منطقی بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط مهندسین مشاور طرح‌ها و تجربیات دست‌اندرکاران صنعت آب و فاضلاب کشور برای شرایط ایران کالیبره گردیدند.

نتایج

ابتدا بایستی در نظر داشت که یک سیستم تصفیه فاضلاب واحدهای متعددی دارد که این واحدها به نوبه خود می‌توانند انواع مختلفی داشته باشند. به عنوان مثال یک سیستم تصفیه فاضلاب به روش لجن فعال به طور معمول دارای واحدهای تصفیه مقدماتی (آشغال‌گیر، دانه‌گیر و اندازه‌گیر جریان)، ته‌نشینی اولیه، هوادهی، ته‌نشینی ثانویه، تغلیظ کننده لجن، هاضم، خشک کننده لجن و کلرزنی می‌باشند. از بین واحدهای ذکر شده، واحدهایی که از نظر فرآیندی دارای بیشترین تنوع هستند شامل حوض هوادهی، تانک تغلیظ کننده لجن و هاضم‌ها می‌باشند.

توابع هزینه برای واحدهای مختلف یک سیستم تصفیه فاضلاب به روش لجن فعال در ایران در جدول ۱

ارائـه شده‌اند. این هزینه‌ها به تفکیک هزینه سرمایه‌گذاری اولـیه (CC) و هزیـنه سـالیانه راهبری، تعمیر و نگهداری (O&M) مـی‌باشـند و بـا در نظر گرفتن برآورد هزینه بر اسـاس فهرست بهای سال ۱۳۷۹ ارائه شده‌اند. لذا استفاده از آنها در سال‌های غیر از ۱۳۷۹ با اعمال ضرائب مربوطه از جملـه ضـریب شاخص تعدیل قیمت‌ها میسر است. از نظـر مدیریـت اقتصـادی یـک سیسـتم لجـن فعال عمده سـرمایه‌گـذاری و هزینه تصفیه‌خانه در حوض هوادهی و واحدهـای تصـفیه لجـن (تغلـیظ کـنـنده‌هـا، هاضـم‌ها و بسـترهای خشک کننده لجن) صورت می‌پذیرد. بر همین اسـاس در جـدول ۱ تـابع هزیـنه برای چهار نوع حوض هوادهـی، سـه نـوع تـانک تغلـیظ کـنـنده لجن و دو نوع هاضـم، کـه در یـک سیسـتم لجـن فعـال بیشـتر استفاده مـی‌شـوند، داده شـده است. بر اساس توابع ارائه شده در جـدول ۱ مـی‌تـوان پس از جایگذاری مقادیر پارامترهای طراحـی مـربوط بـه هـر واحـد (D, C, B, A) هزیـنه سـرمایه‌گذاری و راهبری و نگهداری آن واحد را محاسبه نمـود. بایسـتی گفت که تعیین این توابع بر اساس برآورد هزینه تصفیه‌خانه فاضلاب شیراز با دبی طراحی ۹٤۰ لیتر بـر ثانـیه بـوده اسـت. این توابع توانایی بهینه‌یابی سیستم تصفیه لجن فعال با ترکیب‌های متعددی از این واحدها را ارائـه مـی‌دهند. در این جدول کیفیت فاضلاب ورودی به تصـفیه‌خانه ، ثابت و برابر با کیفیت معمول فاضلاب‌های شـهری (در حـدود BOD_5 = ۲۵۰mg/lit) در نظـر گرفته شـده اسـت. لیکن کمیت فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه در محدوده دبی‌های کمتر از ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه متغیر بوده

جدول ۱- توابع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (CC) و راهبری و نگهداری (O&M).

نام واحد	CC	O&M
آشغالگیر + دانه‌گیر	CC=۸۳۷۹* (A)^۱/۷۹۷	O&M=۱٦۷* (A)^۱/۷۹۷
ته‌نشینی اولیه	CC=۱۸٦۹* (B)^۱/۷٤٤	O&M=۳۷* (B)^۱/۷٤٤
حوض هوادهی نهرگونه (Plug flow)	CC=۲۳۸۷۷* (A)^۱/۷۸۷	O&M=٤۷۷* (A)^۱/۷۸۷
حوض هوادهی اختلاط کامل (Compeletly Mixed)	CC=۳۲۸۸۲* (A)^۱/۸۰۵	O&M=۹۸٦* (A)^۱/۸۰۵
حوض هوادهی گسترده (Extended Aeration)	CC=٤۳۰۳۳* (A)^۱/۸۱	O&M=۱۷۲۱* (A)^۱/۸۱
حوض هوادهی با بار بالا (High Rate)	CC=۱۳۰٦۳* (A)^۱/۸۰٤	O&M=۳۹۱* (A)^۱/۸۰٤
ته نشینی نهایی	CC=۱٦۰٦* (B)^۱/۷۱۸	O&M=۳۲* (B)^۱/۷۱۸
تانک تغلیظ لجن (ثقلی)	CC=۳۱٦٦۰۰* (B)^۱/۳٤	O&M=٦۳۳۲* (B)^۱/۳٤
تانک تغلیظ لجن (فیلتر خلاء)	CC=۵۵٤۲۵* (B)^۱/۸۷	O&M=۱٦٦۳* (B)^۱/۸۷
تانک تغلیظ لجن (سانتریفوژ)	CC=۱۲۰۹٤* (C)^۲/۰۸٦	O&M=٤۸٤* (C)^۲/۰۸٦
هاضم بیهوازی	CC=۲۸۷/٦* (D)^۱/۰۲۹	O&M=۵/۷۳* (D)^۱/۰۲۹
هاضم هوازی	CC=۱۱/۱۷* (D)^۱/۳۰۲	O&M=۰/٤٤۷* (D)^۱/۳۰۲
بستر خشک کننده	CC=۳۵۷۹۲* (B)^۱/۱٦	O&M=۷۱٦* (B)^۱/۱٦

CC : هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بر حسب میلیون ریال

O&M : هزینه سالیانه راهبری، تعمیر و نگهداری بر حسب میلیون ریال

A : دبی طراحی تصفیه‌خانه فاضلاب بر حسب (lit/sec)

B: سطح واحد مربوطه بر حسب (m^2)

C : میزان جریان لجن ورودی به واحد مربوطه بر حسب (lit/sec)

D : حجم واحد مربوطه بر حسب (lit)

و در ایـن محـدوده جـواب‌هـای قـابل قبولـی ارائـه مـی‌دهـد.لازم بـه ذکـر است توابع نمایی ارائه شده برای واحدهـای مختلف تصفیه‌خانه در محدوده‌هایی از دبی و کیفیـت فاضلاب ورودی به همان واحد قابل اعمال است که در استانداردهای مربوط ارائه شده است.

بایستی در نظـر داشـت که در بهینه‌یابی سیستم لجن فعـال انـتخاب هـر واحـد مـی‌توانـد نـوع، ظرفیـت و مشخصات واحدهای قبل و بعد از خود را نیز تحت تأثیر قرار دهد. به عنوان مثال انتخاب حوض هوادهی به روش هوادهـی گسـترده[1] معمـولا" مستلزم هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولـیه بیشـتری نسبت به سایر انواع حوض های هوادهی می‌باشد و لیکن این واحد به علت شرایط فرایندی خاص خـود منـجر بـه تولید لجن کمتری خواهد شد که این امر در ظرفیـت و هزیـنه واحدهای تصفیه لجن (که خود در حدود ۵۰ درصد هزینه کل تصفیه‌خانه را شامل می‌شوند) تأثـیر می‌گذارد. همچنین انتخاب هاضم به روش هوازی، معمـولا" بـه معـنای عـدم نیاز به واحد تغلیظ کننده لجن می‌باشد که این امر نیز هزینه سرمایه‌گذاری تصفیه‌خانه را تحـت تأثـیر قـرار مـی‌دهد. به علت همین چند مرحله‌ای بـودن سیسـتم‌هـای تصـفیه و ساختار خاص ارتباطی بین آنهاسـت کـه بایسـتی جهـت بهیـنه‌یابـی از یـک بـرنامه کامپیوتری استفاده نمود.

بـا آنالـیز حساسـیت بـر روی توابـع هزیـنه مشخص گـردید کـه برای یک دبی طراحی نمونه تصفیه‌خانه، تابع هزیـنه حـوض هوادهـی و هاضم بار مالی بسیار بیشتری نسبت به تانک تغلیظ کننده لجن نشان می‌دهند. به منظور بررسـی بیشـتر نحـوه تغییرات توابع کل هزینه چهار نوع حوض هوادهی، که در بهینه‌یابی سیستم تصفیه لجن فعال مطـرح مـی‌باشـند، این توابع در شکل ۱ ارائه گردیده‌اند. این شکل ارزش فعلی کلیه هزینه‌های هر حوض (PWC) را بر حسب دبی ورودی به آن (دبی طراحی تصفیه‌خانه) نشـان مـی‌دهد. در تهیه این شکل جهت تبدیل هزینه‌های سـالیانه بـه ارزش فعلی در زمان آغاز طرح (PWC)، نرخ بهـره ۸٪ و عمـر مفـید تأسیسات و تجهیزات ۳۰ سال در نظـر گرفـته شـده اسـت. همـان طـور کـه در ایـن شکل ملاحظـه مـی‌شـود حـوض هوادهـی گسـترده و حوض هوادهـی با بار آلی بالا در تمام دبی‌ها به ترتیب گرانترین و ارزانتریـن حـوض هوادهـی می‌باشند. اما بایستی توجه داشـت کـه لجـن تولیدی در این حوض‌ها تقریبا" نسبت معکـوس بـا هزینه آنها دارد. یعنی حوض هوادهی گرانتر با تولید لجن کمتر باعث صرفه‌جویی در هزینهٔ واحدهای بعـدی (تصفیه لجن) می گردد. از آنجا که هزینه تصفیه لجـن درصـد بالایی از کل هزینه این سیستم‌ها را به خود اختصـاص مـی‌دهد، بنابراین بهینه‌یابی یک سیستم تصفیه فاضـلاب بایسـتی بـا بررسـی مجموع هزینه کل واحدها صورت پذیرد.

ارزش فعلـی هزیـنه کـل دو نوع هاضم همانند ارزش فعلـی حـوض هـای هوادهی محاسبه و در شکل ۲ نشان داده شـده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌گردد هاضـم هـوازی بـه ازای کلـیهٔ دبـی‌هـای لجن ورودی از هاضـم بی‌هوازی گرانتر می‌باشد. لازم به توضیح است که در صـورت انـتخاب هاضـم هوازی معمولا" واحد تغلیظ کـنـنده لجـن حـذف مـی‌گردد که این موضوع بایستی در بهینه‌یابی اقتصادی مد نظر قرار گیرد. همچنین میزان لجن خروجـی از هاضـم هـوازی بیشتر از این میزان در هاضم بـیهوازی بـوده کـه تأثیر مستقیم بر روی هزینه بسترهای لجن خشک کن (واحد بعدی)دارد.

به عنوان یک بررسی موردی، هزینه چهار نوع حوض هوادهی، سه نوع تانک تغلیظ کننده لجن و دو نوع هاضم بـرای دبـی طراحـی ۹٤۰ لیـتر بـر ثانـیه (دبـی طراحـی تصـفیه‌خانه فاضلاب شهر شیراز) به طور دستی محاسبه و نتایج آن در جدول ۲ ارائه گردیده است.

برای تبدیل O&M به زمان آغاز طرح، نرخ بهره ۸٪ و عمـر مفـید تأسیسـات و تجهیزات ۳۰ سال در نظر گرفته شده است.

لازم بـه توضـیح اسـت کـه انواع مختلف حوض‌های هوادهـی مـیزان لجـن تولیدی متفاوتی دارند که در هزینه واحدهای بعدی مؤثر است. به طور کلی هزینه هر یک از واحدهـای مخـتلف تصـفیه خانـه بـر حسب پارامترهای طراحـی فرآیـندی آن واحد مانند زمان ماند سلولی، میزان بـارگذاری مجـاز، درصد هضم و ... می‌تواند متغیر باشد. پارامـترهای طراحی فرآیندی هر واحد علاوه بر هزینه آن واحد خصوصیات فاضلاب خروجی از واحد را نیـــز

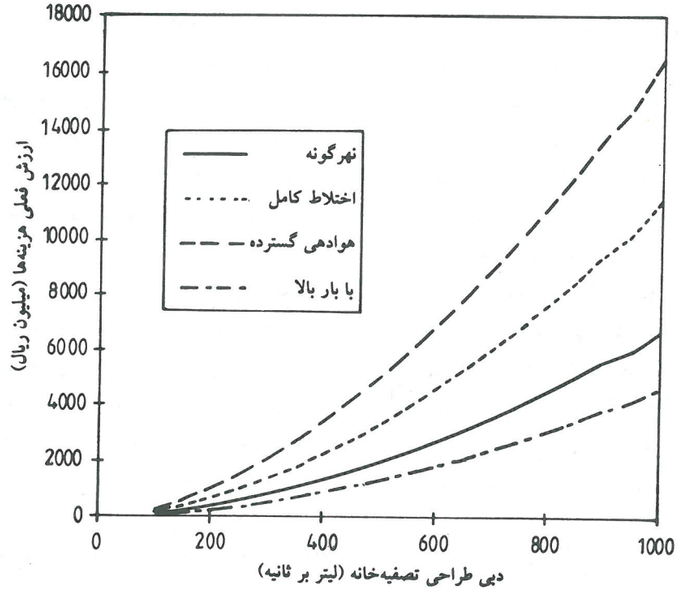
[1] Extended Aeration

جدول ۲- ارزش فعلی هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و راهبری و نگهداری برای واحدهای مختلف.

نام واحد	*CC و O&M (میلیون ریال)
حوض هوادهی(Plug-Flow)	۵۹۰۷/۸۳
حوض هوادهی (Completely Mixed)	۱۰۲۲۹/۲۸
حوض هوادهی (Extended Aeration)	۱۵۰۱۹/۳٤
حوض هوادهی (High-Rate)	۳۰۵۳/۲۹
تانک تغلیظ لجن (ثقلی)	۱۵۸۰/۰۷
تانک تغلیظ لجن (صافی خلاء)	۲۲۷۹/۲۲
تانک تغلیظ لجن (سانتریفوژ)	٤۸۸۵/۳۸
هاضم بی‌هوازی	٦۹۰۷/۵۸
هاضم هوازی	۷۷٤۷/۳۳

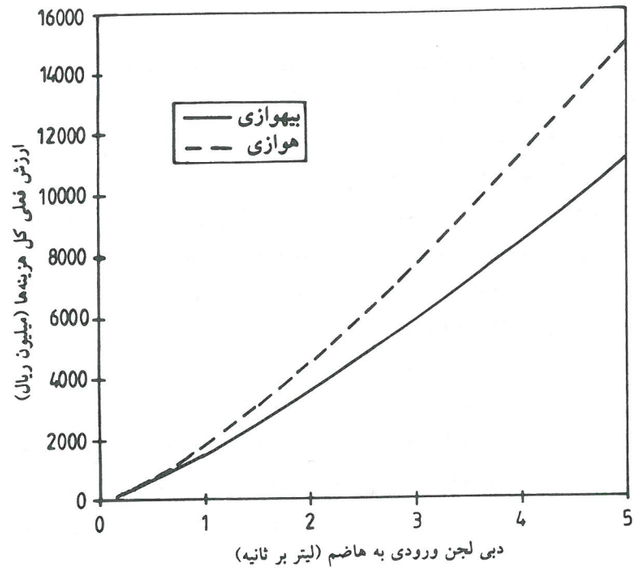
CC : هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بر حسب میلیون ریال

O&M : هزینه سالیانه راهبری، تعمیر و نگهداری بر حسب میلیون ریال



شکل ۱- ارزش فعلی کل هزینه‌ها در انواع مختلف حوض‌های هوادهی

کنترل می‌کند. خصوصیات فاضلاب خروجی از هر واحد به نوبه خود بر روی هزینه واحدهای بعدی تصفیه‌خانه تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال افزایش زمان ماند سلولی (با ثابت بودن سایر پارامترهای طراحی) در حوض‌های هوادهی باعث افزایش حجم واحد و در نتیجه افزایش هزینه آن می‌گردد. از طرف دیگر، افزایش زمان ماند سلولی در حوض‌های هوادهی باعث افزایش راندمان حذف مواد آلی و متعاقباً کاهش میزان لجن خروجی از حوض می‌گردد این موضوع به نوبه خود هزینه واحد بعدی (تانک تغلیظ کننده لجن و هاضم) را کاهش می‌دهد. در برآورد هزینه ارائه شده در جدول ۲، پارامترهای طراحی فرآیندی هر واحد به صورت عددی



شکل ۲- ارزش فعلی کل هزینه‌ها در انواع مختلف هاضم‌ها

ثابت (بدون تغییرات) و بر اساس طراحی تصفیه‌خانه فاضلاب شیراز منظور شده‌اند. به عنوان مثال در این جدول میزان لجن تولیدی از حوض هوادهی معادل ٦/۵ در هزار دبی طراحی (برای حوض هوادهی نهرگونه و با بار آلی بالا) در نظر گرفته شده است. همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد ضمن وجود ترکیب‌های مختلف از واحدهای فرآیندی با هزینه‌های متفاوت، دو ترکیب دارای هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و راهبری و نگهداری کمتری نسبت به بقیه هستند که یکی حوض هوادهی نهرگونه + تانک تغلیظ کننده ثقلی + هاضم بی‌هوازی و دیگری حوض هوادهی با بار آلی بالا +تانک تغلیظ کننده ثقلی + هاضم بی‌هوازی با مجموع هزینه‌های (به ترتیب) ۱٤۳۹۵/٤۸ و ۱۱۵٤۰/۹٤ میلیون ریال می‌باشند. به همین ترتیب می‌توان ترکیب‌های مختلف بهینه واحدها از نظر اقتصادی را مشخص کرد.

در اینجا باید به یک نکته مهم توجه نمود و آن مد نظر قرار دادن پارامترهای غیر اقتصادی مانند شرایط محلی، فرهنگی ، اجتماعی، تکنولوژیکی، سیاسی و غیره از یک طرف و مسائل و دیدگاه‌های مدیریت طرح‌ها از طرف دیگر است. این پارامترها از جمله مسائلی هستند که در بسیاری از کشورهای جهان، مخصوصاً کشورهای در حال توسعه (مانند ایران) ، می‌توانند علاوه بر مسائل اقتصادی از عوامل تأثیرگذار بر روی انتخاب نوع سیستم تصفیه مناسب باشند. لذا علیرغم آن که ارائه اقتصادی‌ترین (بهینه‌یابی) واحدهای یک سیستم تصفیه لجن فعال خود گام مهمی در تصمیم‌گیری و انتخاب آنها می‌باشد، به دلایل ذکر شده همیشه اقتصادی‌ترین طرح الزاماً طرح انتخاب شده نیست.

بحث و نتیجه‌گیری

به علت چند مرحله‌ای بودن سیستم‌های تصفیه فاضلاب و ساختار خاص ارتباطی بین آنها بایستی جهت بهینه‌یابی این سیستم‌ها از یک برنامه کامپیوتری استفاده نمود. بررسی اسناد و مدارک برآورد هزینه تصفیه‌خانه‌های طراحی شده در کشور نشان داد که یک ارتباط منطقی بین دبی‌های طراحی و برآوردهای هزینه انجام شده برقرار نبوده است. از یک دیدگاه مدیریتی، یکی از علت‌های عدم وجود هماهنگی در برآورد هزینه تصفیه‌خانه‌های مختلف کشور با دبی‌های طراحی آنها را می‌توان درعمر کوتاهی دانست که از تشکیل مدیریت واحد و نظارت هماهنگ و همه جانبه بر صنعت آب و فاضلاب کشور (در قالب شرکت‌های آبفا) می‌گذرد.

تجربه اندک تصفیه‌خانه‌های اجرا شده، عدم وجود بانک اطلاعاتی منسجم در این زمینه، و بالاخره وجود مشاورهای مختلف در این تصفیه‌خانه‌ها از عوامل دیگر این عدم هماهنگی است.

توابع ارائه شده در این مقاله می‌توانند به عنوان ابزاری جهت برآورد اولیه هزینه سرمایه‌گذاری و راهبری و نگهداری واحدهای مختلف یک سیستم تصفیه فاضلاب به روش لجن فعال مورد استفاده قرار گیرند. این توابع توانایی بهینه‌یابی سیستم تصفیه لجن فعال با ترکیب‌های متعددی از واحدهای مختلف را ارائه می‌دهند. با آنالیز حساسیت بر روی توابع هزینه مشخص گردید که برای یک دبی طراحی نمونه، تابع هزینه حوض هوادهی و هاضم، بار مالی بسیار بیشتری نسبت به سایر واحدها نشان می‌دهند. پارامترهای غیر اقتصادی مانند شرایط محلی، فرهنگی، اجتماعی. تکنولوژیکی، سیاسی و غیره از یک طرف و مسائل و دیدگاه‌های مدیریت طرح‌ها از طرف دیگر نیز بایستی مد نظر قرار گیرند. این پارامترها از جمله مسائلی هستند که در بسیاری از کشورهای جهان، مخصوصاً کشورهای در حال توسعه (مانند ایران) می‌توانند علاوه بر مسائل اقتصادی از عوامل تأثیر گذار بر روی انتخاب نوع سیستم تصفیه مناسب باشند.

با توجه به سرمایه‌گذاری‌های کلان کشور در امر تصفیه فاضلاب و لزوم صرفه‌جویی اقتصادی در این زمینه مدل ارائه شده می‌تواند با بهینه‌یابی اقتصادی تصمیم‌گیری مدیران و دست اندرکاران صنعت آب و فاضلاب کشور را در امر انتخاب سیستم‌های یاد شده تسهیل نماید.

منابع و مراجع

1- Blank, L.T., and Tarquin, A.J. (1989). " *Engineering Economy* ", McGraw-Hill. International Editions, Third Edition.

2- Ellis, K.V., and Tang, S.L. (1991). " *Wastewater Treatment Optimization Model for Developing World I: Model Development Systems,* " J. Environmental Engineering, ASCE, 117(4) 301-318.

3- Fujiwara, O. (1990). " *Preliminary Optimal Design Model for Wastewater Treatment Plants* ", J. Environmental Engineering, ASCE, 116(1) 206-210.

4- Grady, C.P.L. Jr. (1977). " *Simplified Optimization of Activated Sludge Process* " , J. Environmental Engineering, ASCE, 103(3) 413-429.

5- Joshi, V., and Khanna, P. (1983). " *Optimal Design of Municipal Wastewater Treatment Systems Using Dynamic Programming* ", Asian Enviromental, 25-36.

6- Lynn, W.R., Logun, J.A., and Charnes, A. (1962). " *System Analysis for Planning Wastewater Treatment Plant* ", J. Water Pollution Control Federation, 34(6) 565-581.

7- Peterson, T.P. (1978). " *Design of Wastewater Treatment Facilities Major Systems* ", Engineer Manual EM 1110-2-50, Part 3, Department of the Army, Corps of Engineers, Sep.

8- Rich, L.G.R. (1996). " *Modification of Approach to Aerated Lagoons* ", J. Environmental Engineering, ASCE, 122(1) 149-161.

9- Rao, S.S. (1991). " *Optimization Theory and Practice* ", Second Edition, Wiley Eastern Limited, New Dehli.

10- Steel, E.W., and McGhee, T.J. (1979). " *Water Supply and Sewerage* ", McGraw-Hill International Editions, Fifth Edition.

11- Tchobanoglous, G. (1991). " *Wastewater Engineering* ", Metcalf & Eddy Inc.

12- Tyteca, D., Smeers, Y., and Nyms, E.J. (1977). " *Mathematical Modeling and Economic Optimization of Wastewater Treatment Plants* ", CRC Critical Rev. in Environmental Control, 8(1)1.

13- Tyteca, D., and Smeers, Y. (1981). " *Non-Linear Programming Design of Wastewater Treatment Plants* " J. Environmental Engineering ,ASCE, 107(4) 767.