

Research Paper

مقاله پژوهشی

Redevelopment of BSM1 Model to Model the Wastewater Treatment System of Carousel Oxidation (Case Study: South Tehran Wastewater Treatment Plant)

Sara Nazif^{1*}, Yaser Khatibi², Anahita Pourmohamadi² and Ali Khajavian³

1- Associate Professor, School of Civil Engineering, College of engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

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

3- M.Sc. Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

* Corresponding Author, Email: snazif@ut.ac.ir

Received: 14/01/2023

Revised: 27/03/2023

Accepted: 10/05/2023

© IWWA

بررسی سناریوهای مختلف کالبراسیون در مدل باز توسعه داده شده BSM1 برای مدل سازی سیستم تصفیه فاضلاب نهر اکسیداسیون کاروسل (مطالعه موردی: تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران)

سارا نظیف^{۱*}، یاسر خطیبی^۲، آناهیتا پورمحمدی^۲ و علی خواجهان^۳

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

Due to continuous changes in the quantitative and qualitative characteristics of wastewater influent in wastewater treatment plants (WWTPs), it is necessary to evaluate the performance of WWTPs under different conditions and adopt appropriate control strategies. The first step in evaluating and improving the performance of a WWTP is to model it. In recent years, there has been an increase in the application of simulation software and mathematical models for this purpose. Calibration is considered the most important step in modeling because improper calibration can lead to unrealistic results with a large error. The main objective of this research is to redevelop the BSM1¹ model and provide different calibration scenarios to model the carousel oxidation system on a real scale. The high-accuracy model can then be used for various purposes, such as implementing different control strategies and improving the performance of the WWTP under different operating conditions. The developed model was implemented on modules 5 and 6 of the WWTP located in the south of Tehran. After determining the suitable process models for different units of the wastewater treatment plant, model calibration based on the GMP² protocol was performed under two scenarios: 1) simultaneous calibration of parameters, and 2) step-by-step calibration of parameters. In each scenario, two objective functions were considered to evaluate the effect of main variables, including COD, TSS, and TN, and secondary variables, including X (MLSS³ of the aeration tank) and Xr (MLSS of the return sludge). The genetic algorithm was used to optimize the objective functions during the calibration process. The results showed that in the static calibration, the average error of all variables, as well as the variables considered in the objective function in scenario 2, were significantly reduced compared to scenario 1. The values in scenario 2 for objective function 1 were 2.7%, 7.8%, 8.2%, and 4.3% for the variables mentioned. Additionally, by considering more variables in the objective function, the cumulative error of all variables was reduced. In dynamic calibration, the average error rates of the model for TSS, COD, and TN were 29.8%, 19.8%, and 10.3%, respectively.

Keywords: Modeling of wastewater treatment plant, BSM1, Calibration, Calibration objective function, Carousel oxidation ditch system.

چکیده

به دلیل تغییرات پیوسته مشخصات کمی و کیفی فاضلاب ورودی به تصفیه خانه فاضلاب، ارزیابی عملکرد تصفیه خانه و اتخاذ استراتژی های مناسب و به هنگام ضروری است. اولین گام برای ارزیابی و بهبود عملکرد تصفیه خانه ها، مدل سازی تصفیه خانه است. در سال های اخیر استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی و مدل های ریاضی برای مدل سازی تصفیه خانه فاضلاب توسعه یافته است. کالبراسیون مهم ترین قدم در مدل سازی به شمار می رود، زیرا که کالبراسیون نامناسب نتایج را غیر واقعی و یا همراه با خطای زیاد نشان می دهد. هدف از این مطالعه کاربردی، باز توسعه مدل BSM1^۱ و ارائه سناریوهای مختلف کالبراسیون به منظور مدل سازی سیستم نهر اکسیداسیون کاروسل در مقیاس واقعی است تا بتوان از مدلی با دقت بالا برای اهداف بعدی هم چون اعمال استراتژی های کنترل و بهبود عملکرد تصفیه خانه تحت شرایط بهره برداری مختلف استفاده کرد. مدل توسعه داده شده بر روی مدول ۵ و ۶ تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران پیاده سازی شد. پس از تعیین مدل های فرایندی مناسب برای واحدهای مختلف تصفیه خانه فاضلاب، کالبراسیون مدل بر اساس پروتکل GMP^۲ و تحت دو سناریوی ۱) کالبراسیون همزمان پارامترها به صورت گام به گام انجام شد. در هر یک از سناریوهای ذکر شده، دو تابع هدف در نظر گرفته شده است تا اثر متغیرهای اصلی شامل COD، TSS، TN و متغیرهای فرعی شامل X (MLSS^۳ تانک هوادهی) و Xr (MLSS لجن برگشتی) در نظر گرفته شود. در فرایند کالبراسیون از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی توابع هدف استفاده شده است. نتایج نشان داد که در کالبراسیون استاتیک، میزان خطای متوسط همه متغیرها و نیز متغیرهای در نظر گرفته شده در تابع هدف در سناریو ۲ نسبت به سناریوی ۱ به میزان قابل توجهی کاهش می یابد که مقدار آن ها در سناریوی ۲ برای تابع هدف ۱ و ۲ به ترتیب ۲.۷٪، ۷.۸٪، ۸.۲٪، و ۴.۳٪ است. همچنین با در نظر گرفتن تعداد متغیر بیشتر در تابع هدف، خطای جمعی همه متغیرها کاهش می یابد. در کالبراسیون دینامیک میزان خطای متوسط مدل در تخمین میزان TSS، COD و TN به ترتیب ۲۹.۸٪، ۱۹.۸٪، و ۱۰.۳٪ به دست آمد.

کلمات کلیدی: مدل سازی تصفیه خانه فاضلاب، BSM1، کالبراسیون، نهر اکسیداسیون کاروسل، تابع هدف کالبراسیون.

در سایر پروتکل‌ها را پوشش می‌دهد. (Lindblom et al., 2020) از پروتکل GMP به منظور ایجاد فرایند مدل‌سازی و بررسی عدم قطعیت داده‌های ورودی با استفاده از روش مونت کارلو استفاده کرده است که استفاده از این پروتکل در رسیدن به هدف مورد نظر تاثیر به‌سزایی داشته است. (Elawwad et al., 2019) از پروتکل STOWA به منظور مدل‌سازی، کالیبراسیون و بهینه‌سازی تصفیه‌خانه فاضلاب استفاده کرده است. در این تحقیق، مدل‌سازی هاضم بی‌هوازی و لجن فعال در نرم‌افزار Biowin انجام شده است. شبیه‌سازی فرآیند تصفیه‌خانه فاضلاب شامل دو مرحله کالیبراسیون و صحت‌سنجی است. کالیبراسیون مدل به منظور تنظیم مجموعه پارامترهای مدل‌های فرآیندی با هدف حداقل کردن خطا میان داده‌های مشاهداتی و داده‌های به‌دست‌آمده از مدل ضروری است. امروزه، انجام کالیبراسیون به‌صورت اتوماتیک توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است، این درحالی است که انجام کالیبراسیون به‌صورت دستی، وقت‌گیر و دارای خطای بیشتری است (Shahed Behrouz et al., 2020). در کالیبراسیون اتوماتیک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای تخمین پارامترها استفاده می‌شود که رویکردهای زیادی برای مدل‌سازی تصفیه‌خانه وجود دارد (Zeferino et al., 2009). به‌طور مثال، (Kim et al., 2002) امکان استفاده از الگوریتم ژنتیک در مدل لجن فعال ASM1^۹ را در تحقیق خود نشان داد. این درحالی است که (Zeferino et al., 2009) از الگوریتم PSO برای کالیبراسیون مدل لجن فعال استفاده کرده است. Sin et al., (2008) یک رویکرد کارآمد با استفاده از روش مونت کارلو برای کالیبراسیون معرفی کرد. (Tomita and Park, 2009) در تحقیق خود از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند که در آن تابع هدف دو متغیره شامل متغیرهای خروجی تصفیه‌خانه و هزینه را به‌منظور بهینه‌کردن نقاط تنظیمی کنترل‌کننده در نظر گرفته‌اند. از طرفی، در بیشتر موارد، تنها تعداد کمی از پارامترها، یا با روش آزمون و خطای دستی یا با ترکیب یک الگوریتم بهینه‌سازی تخمین زده می‌شوند، درحالی‌که بیشتر پارامترها در مقادیر پیش‌فرض خود باقی می‌مانند (Rajaei and Nazif, 2022; Nazif et al., 2023). که این موضوع خود می‌تواند باعث پیچیدگی و حتی ایجاد خطا در مسئله شود که باید دقیق‌تر بررسی شود. هم‌چنین رجایی و همکاران (۱۳۹۶)، به‌منظور بررسی تاب‌آوری سیستم ابتدا کالیبراسیون و صحت‌سنجی را انجام داده است. نتایج به‌دست‌آمده از مرحله کالیبراسیون و صحت‌سنجی استاتیک در تمامی موارد درصد خطای کمتر از ۱۰٪ را نشان داد و در مرحله دینامیک نیز مدل قادر به ارائه تخمین مناسبی از رفتار دینامیک فرآیندهای

امروزه با توجه به گسترش فعالیت‌های مختلف صنعتی و خانگی که منجر به تولید فاضلاب می‌شوند، حفاظت از محیط‌زیست و بهبود کیفیت منابع آب بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است که بدین منظور، استانداردها و قوانین سخت‌گیرانه‌ای در ارتباط با پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تدوین شده است. با توجه به اهمیت این موضوع، بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌ها در شرایط مختلف بهره‌برداری ضروری است (Cao et al., 2021). برای ارزیابی عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب، استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و مدل‌های ریاضی در سال‌های اخیر رایج شده است که کم‌هزینه، سریع و دقیق بوده (Petersen et al., 2002) و امکان تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی رفتار تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را بدون نیاز به انجام آزمایش‌های فیزیکی فراهم می‌کند (Hvala et al., 2018).

برای شبیه‌سازی تصفیه فاضلاب ابزارهای مختلفی با ویژگی‌های متفاوت توسعه یافته‌اند که یک دسته کدهای عمومی بوده که در نرم‌افزارهای مختلف قابل استفاده هستند و یک دسته نرم‌افزارهای خاص هستند که معمولاً یک کتابخانه حاوی مدل‌های موجود برای واحدهای مختلف تصفیه را دارا بوده و کاربر به آسانی قادر به انجام مدل‌سازی خواهد بود (رجایی، ۱۳۹۹). مشکل این دسته از نرم‌افزارها محدودیت‌های موجود در مدل‌های مورد استفاده در نرم‌افزار است (Gernaey et al., 2004). از جمله نرم‌افزارهای این دسته SUMO، SOAT، Biowin، GPS-X هستند (اسدی آسیابدری و همکاران، ۱۳۹۴). علاوه بر این نرم افزارها، یک سری از مدل‌های BSM، از جمله BSM1 و BSM2 (Jeppsson et al., 2013)، در ابتدا به‌عنوان چارچوبی برای ارزیابی استراتژی‌های کنترل مختلف در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب توسعه یافتند. با توجه به انعطاف‌پذیری و دسترسی مدل‌های BSM، آن‌ها در سال‌های اخیر به‌طور گسترده در جنبه‌های مختلف مدل‌سازی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Lu et al., 2023).

با توجه به پیچیدگی مدل‌های تصفیه‌خانه فاضلاب و تعداد زیاد پارامتر در این مدل‌ها، دستورالعمل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی فرآیند تصفیه فاضلاب به‌وجود آمده است. در این میان، پروتکل‌های STOWA^۴، BIOMATH^۵، WERF^۶، HSG^۷ و GMP^۸ (Rieger et al., 2012) کاربرد بیشتری داشته و معمولاً در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. پروتکل GMP یک پروتکل جامع است که مجموعه‌ای از مراحل در نظر گرفته‌شده

آن میزان بهینه زمان ماند هیدرولیکی و جریان برگشتی به تصفیه‌خانه را به دست آوردند، که پس از کالیراسیون به حدود ۴۸٪ اختلاف رسیده است.

به منظور بررسی کالیراسیون، ابتدا باید نوع سیستم و هدف آن مورد ارزیابی قرار گیرد. سیستم مورد بررسی در این تحقیق از نوع نهراکسیداسیون کاروسل است. نهراکسیداسیون کاروسل از جمله سیستم‌های تصفیه مناسب برای حذف نیتروژن است که اغلب برای تصفیه فاضلاب شهری از آن استفاده می‌شود (Luo et al., 2020). (Qiu et al., 2018) در مطالعه‌ای، به منظور بهبود عملکرد نهراکسیداسیون و کاهش مصرف انرژی، بخش هوادهی سیستم را مورد بررسی قرار داده و در آن به پارامترهای مربوط به هوادهی توجه ویژه‌ای کردند. (Liu 2019) به منظور ارتقای عملکرد سیستم نهراکسیداسیون در حذف نیتروژن، مدل سازی و کالیراسیون نهراکسیداسیون را انجام داد تا بتواند از مدل با اطمینان بیشتری برای ارتقای عملکرد استفاده کند. پارامترهای طراحی و راهبری سیستم تصفیه فاضلاب نهراکسیداسیون کاروسل و دامنه تغییرات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

تصفیه‌شده است. کلیوند و همکاران (۱۳۹۹) به منظور ارتقای عملکرد تصفیه‌خانه با ارایه راه‌کارهایی همچون اصلاح سیستم هوادهی و تغییر میزان لجن برگشتی، ابتدا کالیراسیون سیستم را در نرم افزار GPS-X انجام دادند که در آن به منظور انجام کالیراسیون پارامترها، با کم و زیاد کردن پارامترهای موثر بر مدل و بررسی تغییرات ایجادشده، پارامترهای حساس را انتخاب و براساس آن کالیراسیون را انجام دادند که به خطای کمتر از ۲۰ درصد رسیدند. هم‌چنین رهنمافر و همکاران (۱۴۰۰) سه تصفیه‌خانه فاضلاب در خراسان رضوی را بررسی و کالیریه کردند. در هر سه تصفیه‌خانه، نتایج مدل ایجادشده تا حدود ۸۰٪ به نتایج اصلی نزدیک است که با بهینه‌سازی کردن و اضافه کردن ته‌نشینی اولیه به این تصفیه‌خانه، در نهایت عملکرد آن‌ها بهبود یافته است. هم‌چنین راندمان تصفیه‌خانه‌ها در کاهش BOD₅ نسبت به سایر پارامترها بسیار بهتر بوده و در طرف مقابل مقدار کاهش آمونیم بسیار پایین بوده است. رحیمی و همکاران (۱۴۰۱) کالیراسیون و آنالیز حساسیت پایلوت سیستم تصفیه فاضلاب را به روش A₂O در نرم‌افزار GPS-X انجام دادند. پس از

جدول ۱- پارامترهای طراحی و راهبری سیستم تصفیه فاضلاب نهراکسیداسیون کاروسل و دامنه تغییرات آن‌ها (Noophan et al., 2018; Qasim, 2017)

پارامترها	دامنه تغییرات
F/M	۰/۰۵ - ۰/۱۵
X تانک هوادهی (mg/l)	۳۰۰۰ - ۶۰۰۰
نسبت لجن برگشتی (%)	۵۰ - ۳۰۰
زمان ماند هیدرولیکی (hr)	۲۴
زمان ماند سلولی (day)	۱۵ - ۳۰
اکسیژن محلول (mg/l)	۱/۲ - ۱/۸

بررسی تاثیر در نظر گرفتن متغیرهای مختلف در تابع هدف کالیراسیون است که با تعریف توابع کالیراسیون مختلف پیاده‌سازی می‌شود. بنابراین هدف اصلی در این تحقیق ابتدا بررسی اثر در نظر گرفتن تمام پارامترهای کالیراسیون و سپس بررسی خطای کالیراسیون تحت سناریوهای مختلف است تا بتوان پس از انجام کالیراسیون مناسب با خطای حداقل، از آن در بهبود سیستم نهراکسیداسیون کاروسل در مقیاس واقعی استفاده کرد. برای این کار مدل BSM1 بازتوسعه داده شده است. در این مدل، کالیراسیون استاتیک براساس نوع کالیراسیون (به دو صورت گام‌به‌گام و به صورت یک‌باره) تحت دو سناریوی مختلف انجام شده است. هم‌چنین در هر سناریو، از دو تابع هدف متفاوت استفاده شده است که اثر در نظر گرفتن یا نگرگرفتن متغیرهای اصلی و فرعی بررسی می‌شود. پس از انجام کالیراسیون استاتیک،

همان‌طور که اشاره شد، در مطالعات گذشته کالیراسیون مدل‌های تصفیه‌خانه فاضلاب عمدتاً به صورت گام‌به‌گام انجام شده است و بسیاری از پارامترهای مورد بررسی در کالیراسیون در نظر گرفته نشده‌اند و مقادیر پیش‌فرض برای آن انتخاب شده است. از طرفی نیز، محققان در کالیراسیون مدل، فقط از یک تابع هدف مشخص استفاده کرده و متغیرهای تابع هدف را نیز با توجه به مطالعات گذشته انتخاب کرده‌اند. هم‌چنین تاثیر در نظر گرفتن متغیرهای مختلف مانند کل جامدات معلق (TSS^۱)، میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD^۱)، نیتروژن کل (TN^۱) و غیره در تابع هدف را بر روی نتایج کالیراسیون مورد ارزیابی قرار نداده‌اند. لذا نوآوری این تحقیق بررسی نتایج کالیراسیون به دو صورت کالیراسیون گام‌به‌گام و کالیراسیون به صورت یک‌باره و با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای مدل است. نوآوری دیگر نیز

تحقیق رسیدن به یک کالیبراسیون مناسب با حداقل خطا است تا بتوان از مدل کالیبره شده برای بهره‌برداری مناسب از تصفیه‌خانه فاضلاب در شرایط مختلف و اعمال استراتژی‌های بهره‌برداری مختلف استفاده کرد. به منظور انجام کالیبراسیون مناسب، لازم است سناریوهای مختلف تحت تابع هدف‌های متفاوت برای این منظور تعریف شود تا عملکرد هر یک بررسی و با یکدیگر مقایسه شوند.

۲-۲- تعیین مرزهای سیستم

چگونگی انتخاب مرزهای سیستم، یک گام حیاتی در مدل‌سازی به‌شمار می‌رود. از آن‌جا که طراحی مدول‌های ۵ و ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران مشابه بوده و به‌صورت یکسان بهره‌برداری می‌شوند، تنها یک مدول برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد که این رویکرد در مطالعات پیشین نیز استفاده شده است (Roeveld and Van Loosdrecht, 2002). در این تحقیق، با توجه به پیچیدگی‌های مدل‌سازی کامل تصفیه‌خانه فاضلاب و نیز تمرکز این تحقیق بر روی بررسی عملکرد سیستم نهراکسیداسیون کاروسل، خط آب تصفیه‌خانه فاضلاب و خط برگشت لجن مدل‌سازی می‌شود. دیاگرام تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران و مرز سیستم انتخابی برای شبیه‌سازی در شکل ۱ نشان داده شده است.

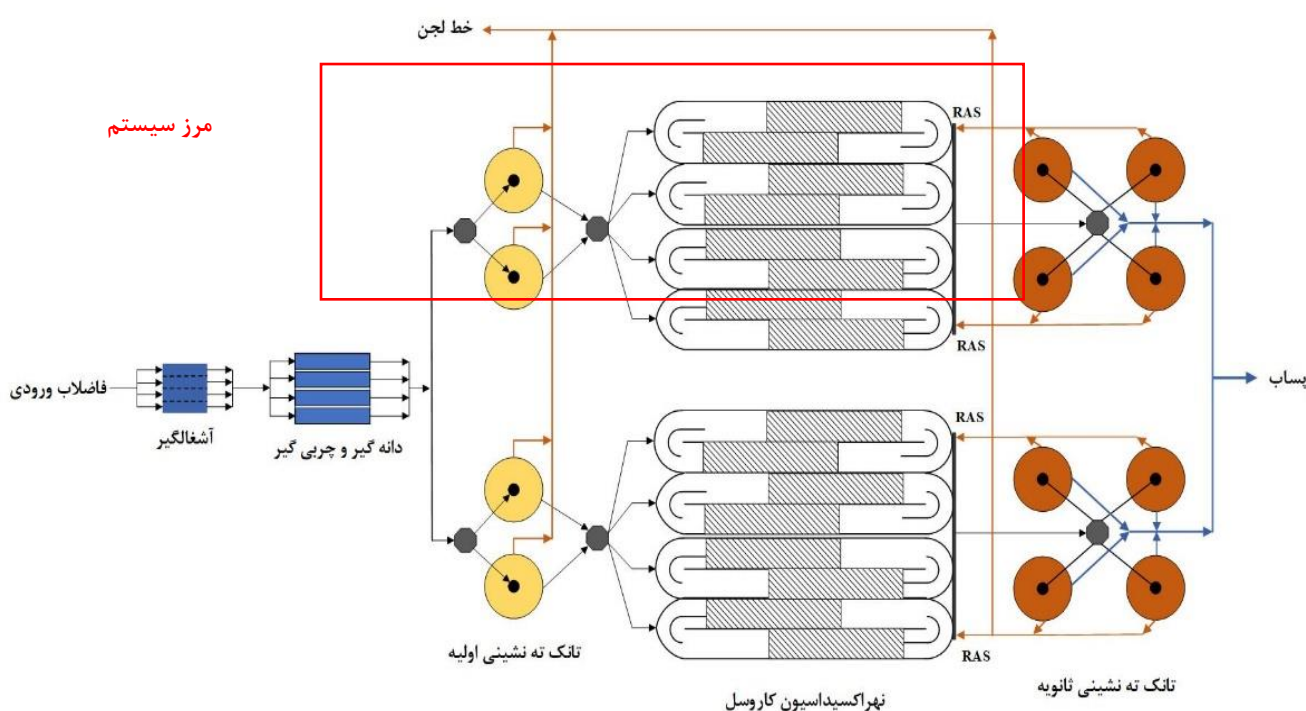
کالیبراسیون دینامیک براساس بهترین نتیجه از کالیبراسیون استاتیک انجام شده است. از مدل بازتوسعه داده شده در این تحقیق می‌توان برای اهداف دیگری همچون اعمال استراتژی‌های کنترل مختلف و بهبود عملکرد سیستم تحت شرایط بهره‌برداری مختلف در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب استفاده کرد.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای شبیه‌سازی سیستم تصفیه‌خانه فاضلاب از دستورالعمل GMP استفاده شده است. طبق این دستورالعمل، مدل‌سازی فرآیندهای تصفیه فاضلاب از چندین مرحله شامل تعیین هدف مدل‌سازی، تعیین مرزهای سیستم، انتخاب مدل‌های فرآیندی (انتخاب و راه‌اندازی مدل‌های فرآیندی، ارتباط میان مدل‌ها)، کالیبراسیون و صحت‌سنجی تشکیل می‌شود (Rieger et al., 2012). در ادامه این بخش، مراحل مدل‌سازی به ترتیب بیان می‌شوند.

۲-۱- تعیین هدف مدل‌سازی

اولین گام در شبیه‌سازی فرآیندهای تصفیه فاضلاب، تعیین هدف است. شبیه‌سازی و مدل‌سازی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌تواند با اهداف مختلفی از جمله شناخت، طراحی و بهینه‌سازی فرآیند انجام شود (Hulsbeek et al., 2002). هدف اصلی این



شکل ۱- دیاگرام تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران و واحدهای انتخابی از آن برای شبیه‌سازی

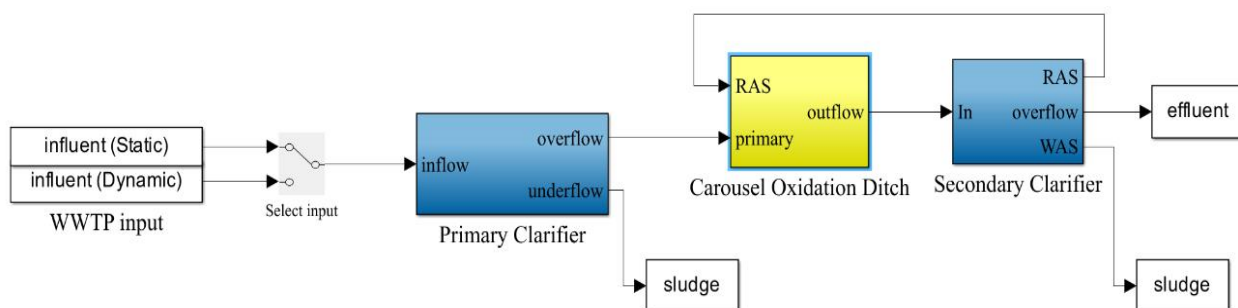
۲-۳- انتخاب مدل‌های فرآیندی

در فرآیند ته‌نشینی اولیه، هدف جداسازی جامدات معلق موجود در فاضلاب خام است، که در طی آن بیش از ۴۰ درصد بار آلی فاضلاب ورودی کاهش می‌یابد (Batstone et al., 2002). در این تحقیق از مدل اوتربیل و فروند^{۱۳} (Otterpohl and Freund, 1992) که از جمله مدل‌های متداول در شبیه‌سازی فرآیند ته‌نشینی جامدات در تانک ته‌نشینی اولیه است، استفاده شده است. به‌منظور شبیه‌سازی تانک ته‌نشینی ثانویه، استفاده از مدل‌های یک‌بعدی و چند لایه رایج هستند (Henze et al., 2019). در این تحقیق برای شبیه‌سازی تانک ته‌نشینی ثانویه از مدل تاکاس (Takacs et al., 1991) استفاده شده است. در این مدل، تانک ته‌نشینی ثانویه به ۱۰ لایه تقسیم شده که ته‌نشینی ذرات جامد در همه لایه‌ها اتفاق می‌افتد. در رابطه با مدل‌سازی فرآیند لجن فعال، تحقیقات بسیار زیادی صورت گرفته و مدل‌های متعددی توسعه یافته است (Henze et al., 2019). امروزه ASM1 یکی از رایج‌ترین مدل‌های لجن فعال است که در بسیاری از تحقیقات و پروژه‌های صنعتی برای مدل‌سازی فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی استفاده شده است (Gernaey et al., 2004). رفتار بیولوژیکی لجن فعال را با استفاده از هشت فرآیند توصیف کردند که شامل رشد هوازای هتروتروف‌ها، رشد آنوکسیک

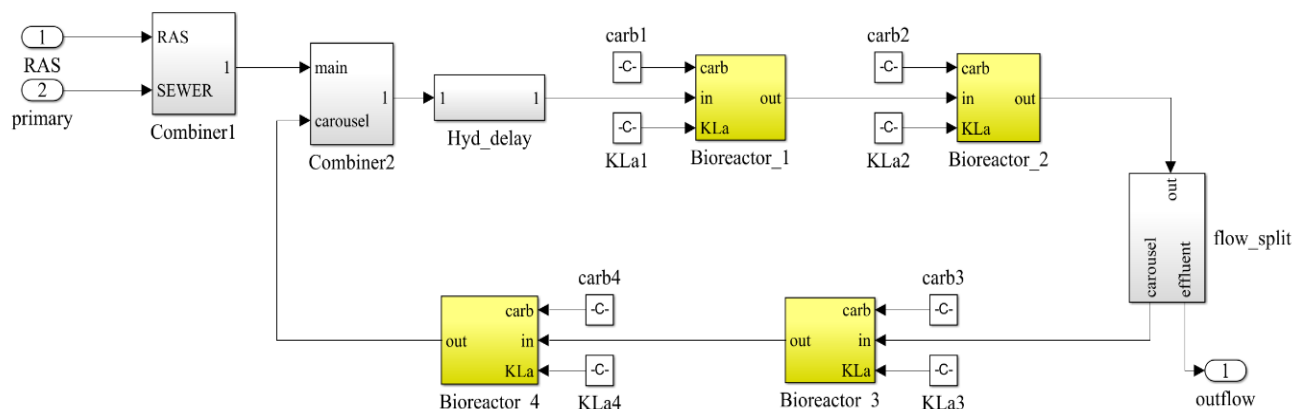
هتروتروف‌ها، رشد هوازای اتوتروف‌ها، زوال هتروتروف‌ها، زوال اتوتروف‌ها، تبدیل نیتروژن آلی محلول به آمونیوم، هیدرولیز مواد آلی به دام افتاده و هیدرولیز مواد آلی نیتروژنی به دام افتاده هستند (رسولی و همکاران، ۱۴۰۱).

۲-۴- پیاده‌سازی مدل

در این تحقیق مدل شبیه‌سازی BSM1 برای ارزیابی عملکرد سیستم نهراکسیداسیون کاروسل و اعمال استراتژی‌های کنترل بر روی آن بازتوسعه داده شده است. مدل بازتوسعه داده شده شامل حوض ته‌نشینی اولیه، نهراکسیداسیون کاروسل و حوض ته‌نشینی ثانویه است که به‌صورت شکل ۲ طراحی شده است. با توجه به این‌که در نهراکسیداسیون کاروسل فاضلاب به‌صورت چرخشی (همانند زمین دو و میدانی) جریان دارد و چهار ناحیه مختلف از لحاظ هوادهی در آن وجود دارد، لذا برای شبیه‌سازی نهراکسیداسیون کاروسل چهار بیورآکتور جداگانه در نظر گرفته که به‌ترتیب به‌صورت آنوکسیک، هوازای، آنوکسیک و هوازای بهره‌برداری می‌شوند. نحوه قرارگیری این بیورآکتور به‌صورت یک حلقه است تا حالت چرخشی جریان فاضلاب را ایجاد کند (شکل ۳).



شکل ۲- نمایی از مدل BSM1 بازتوسعه داده شده



شکل ۳- نحوه مدل‌سازی نهر اکسیداسیون کاروسل

۲-۵- کالبراسیون و صحت‌سنجی مدل

کالبراسیون با هدف تنظیم پارامترهای مدل انجام می‌گیرد، به نحوی که خروجی‌های مدل با داده‌های واقعی به دست آمده از تصفیه‌خانه در مقیاس واقعی تطابق داشته باشند تا مدل توصیف دقیقی از فرآیندهای تصفیه را ارائه دهد. کالبراسیون مدل تصفیه‌خانه فاضلاب به روش‌های مختلفی انجام می‌شود و شامل دو مرحله کالبراسیون استاتیک و دینامیک است. برای انجام کالبراسیون در هر یک از گام‌هایی که پیش‌تر بیان شد، از روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی استفاده می‌شود. یکی از رایج‌ترین روش‌ها، استفاده از بهینه‌سازی تکاملی است که در این میان الگوریتم ژنتیک در تحقیقات زیادی استفاده شده و می‌تواند کارایی مناسبی برای این هدف داشته باشد. در این تحقیق، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی در کالبراسیون مدل تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران استفاده شده است. مشخصات الگوریتم ژنتیک استفاده شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات الگوریتم ژنتیک

احتمال جهش	۰/۶۰
احتمال تزیوج	۰/۸۵
جمعیت هر نسل	۱۰۰
شرط پایان الگوریتم	تغییرات کمتر از ۰/۰۰۱ در تابع ارزیابی در طی گذشت ۲۰ نسل

۲-۶- کالبراسیون استاتیک

هدف اصلی در کالبراسیون استاتیک، بهبود کیفیت متغیرهای خروجی است. به علت استفاده از داده‌های میانگین مشاهداتی به عنوان جریان ورودی به این روش استاتیک گفته می‌شود (Petersen et al., 2002). در این تحقیق، به منظور انجام کالبراسیون استاتیک، از دو سناریو استفاده شده است. در سناریوی اول به منظور انجام کالبراسیون استاتیک، به طور هم‌زمان ضرایب COD، پارامترهای ته‌نشینی اولیه (مدل اوترپل-فروند)، پارامترهای سیستم لجن فعال (ASM1) و پارامترهای مدل ته‌نشینی ثانویه (مدل تاکاس) به عنوان پارامترهای کالبراسیون در نظر گرفته شده‌اند که جمعاً شامل ۳۴ متغیر هستند. این در حالی است که در سناریوی دوم، کالبراسیون پارامترها به طور یک‌باره صورت نگرفته است و به صورت گام‌به‌گام انجام شده است. در واقع، در مرحله اول ابتدا ضرایب COD، پارامترهای ته‌نشینی اولیه (مدل اوترپل-فروند) کالبره شده‌اند (شامل ۹ پارامتر) و پس از اطمینان از این ضرایب و تنظیم کردن آن‌ها، در مرحله بعد پارامترهای سیستم لجن فعال (ASM1) و

پارامترهای مدل ته‌نشینی ثانویه (مدل تاکاس) که شامل ۲۵ پارامتر است، کالبره شده‌اند. در جدول ۳، پارامترهای کالبراسیون استاتیک و مقادیر پیش‌فرض و بازه تغییرات آن‌ها نشان داده شده است.

به منظور بررسی عملکرد کالبراسیون، در هر یک از سناریوهای ذکر شده در بالا، از درصد خطای موجود بین مقدار به دست آمده از شبیه‌سازی و مقدار اندازه‌گیری شده در تصفیه‌خانه واقعی، به عنوان تابع هدف استفاده می‌شود (Tejaswini et al., 2021). در هر یک از دو سناریوی ذکر شده، از دو تابع هدف متفاوت استفاده شده است. در سناریوی اول، تابع هدف یک که در معادله (۱) به صورت $(OF1)_{scenario 1}$ نشان داده شده است، ۷ متغیر شامل متغیرهای اصلی و فرعی $COD_{primary}$ ، $TSS_{primary}$ ، $COD_{effluent}$ ، $TSS_{effluent}$ ، $TN_{effluent}$ ، X_r و X در تابع هدف در نظر گرفته شده است و در تابع هدف دو که در معادله (۲) به صورت $(OF2)_{scenario 1}$ نشان داده شده است، فقط ۵ متغیر شامل متغیرهای اصلی در نظر گرفته شده است که شامل $COD_{primary}$ ، $TSS_{primary}$ ، $COD_{effluent}$ و $TSS_{effluent}$ است.

$$(OF1)_{scenario 1} = \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{PST} + \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{SST} + \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{SST} + \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{PST} + \left| \frac{TN_m - TN_o}{N_o} \right|_{SST} + \left| \frac{X_r - X_o}{X_r} \right| + \left| \frac{X_m - X_o}{MLSS_o} \right| \quad (1)$$

$$(OF2)_{scenario 1} = \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{PST} + \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{SST} + \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{SST} + \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{PST} + \left| \frac{TN_m - TN_o}{N_o} \right|_{SST} \quad (2)$$

که COD : میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی، TSS : کل مواد معلق، TN : نیتروژن کل، X و X_r : به ترتیب نشان‌دهنده $MLSS$ تانک هوادهی و لجن برگشتی، اندیس o و m به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و اندیس PST و SST : نیز به ترتیب نشان‌دهنده تانک ته‌نشینی اولیه و ثانویه هستند.

در سناریوی دوم در هر دو تابع هدف، ابتدا بخش ته‌نشینی اولیه کالبره شده است، تابع هدف مورد نظر به منظور کالبراسیون

داده‌های مشاهداتی روزانه تصفیه‌خانه اجرا می‌شود. در کالبراسیون دینامیک، پارامترهای مدل تنشینی اولیه، ضرایب COD و پارامترهای سینتیک ASM1 همان مقادیر به دست آمده از کالبراسیون استاتیک در نظر گرفته شده‌اند. تابع هدف در نظر گرفته شده در کالبراسیون دینامیک به صورت رابطه (۶) است که در آن n : تعداد داده‌های ورودی است:

$$OF = 1/n \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{(COD_m)_i - (COD_o)_i}{(COD_o)_i} \right|_{SST} + \left| \frac{(TSS_m)_i - (TSS_o)_i}{(TSS_o)_i} \right|_{SST} + \left| \frac{(TN_m)_i - (TN_o)_i}{(TN_o)_i} \right|_{SST} \right) \quad (6)$$

که COD : میزان اکسیژن خواهی شیمیایی، TSS : کل مواد معلق، TN : نیتروژن کل، n : تعداد کل داده‌ها، i : نشان دهنده گام زمانی داده، اندیس o و m : به ترتیب نشان دهنده مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و اندیس SST نیز نشان دهنده تانک تنشینی ثانویه هستند.

به منظور اطمینان از عملکرد کالبراسیون لازم است صحت‌سنجی مدل انجام شود. لذا داده‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند. حدود ۶۰٪ کل داده‌ها برای کالبراسیون مدل و ۴۰٪ مابقی برای صحت‌سنجی مدل استفاده شده است (Arnell, 2016).

۲-۷-۱- شاخص ارزیابی عملکرد کالبراسیون دینامیک

در کالبراسیون دینامیک، به علت پیش‌بینی چند نقطه در یک بار اجرای مدل از شاخص MARE (Mean absolute relative error) برای ارزیابی و مقایسه نتایج استفاده شده است. شاخص MARE مطابق رابطه (۷)، متوسط خطای پیش‌بینی نقاط مشاهداتی را محاسبه می‌کند. محدوده خطای پیش‌بینی قابل قبول ۱۵ درصد تعیین شده است. اما در مورد TSS و به طور کلی متغیرهای با مقدار کم و حساسیت پایین، شاخص درصد خطا نماینده مناسبی نیست. لذا معیار ارزیابی نتایج TSS، اختلاف ۳ میلی‌گرم بر لیتر غلظت TSS به دست آمده از مدل با مقدار مشاهداتی قابل قبول در نظر گرفته شده است.

$$MARE = 1/n \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_m - Y_o}{Y_o} \right| \quad (7)$$

که $MARE$: متوسط خطای نسبی مطلق، Y : متغیر مورد بررسی، n : تعداد کل داده‌ها، اندیس، m و o : به ترتیب نشان دهنده متغیر مدل شده و مشاهداتی است.

تنشینی اول به صورت $(OF)_{primary}$ است که در معادله (۳) نشان داده شده است. فقط متغیرهای مربوط به تنشینی اولیه شامل $COD_{primary}$ ، $TSS_{primary}$ در تابع هدف در نظر گرفته شده است، این در حالی است که با رسیدن به تابع هدف مورد نظر، پارامترهای مربوط به تنشینی اولیه و ضرایب COD کالیبره شده‌اند. پس از کالیبره شدن تنشینی اولیه و ثابت کردن ضرایب COD، دو تابع هدف تعریف شده است. در تابع هدف اول که به صورت $(OF1)_{scenario2}$ در معادله (۴) نشان داده شده است، شامل ۵ متغیر $COD_{effluent}$ ، $TSS_{effluent}$ ، $TN_{effluent}$ ، X_r و X است که متغیرهای اصلی و فرعی هستند. در تابع هدف دوم در معادله (۵) که به صورت $(OF2)_{scenario2}$ است، فقط سه متغیر اصلی شامل $COD_{effluent}$ ، $TSS_{effluent}$ ، $TN_{effluent}$ در نظر گرفته شده است.

$$(OF)_{primary} = \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{PST} + \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{PST} \quad (3)$$

$$(OF1)_{scenario2} = \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{SST} + \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{SST} + \left| \frac{TN_m - TN_o}{N_o} \right|_{SST} + \left| \frac{X_m - X_o}{MLSS_o} \right| + \left| \frac{Xr_m - Xr_o}{Xr_o} \right| \quad (4)$$

$$(OF2)_{scenario2} = \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{SST} + \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{SST} + \left| \frac{TN_m - TN_o}{N_o} \right|_{SST} \quad (5)$$

که COD : میزان اکسیژن خواهی شیمیایی، TSS : کل مواد معلق، TN : نیتروژن کل، X_r و X : به ترتیب نشان دهنده $MLSS$ تانک هوادهی و لجن برگشتی، اندیس o و m : به ترتیب نشان دهنده مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و اندیس PST و SST : نیز به ترتیب نشان دهنده تانک تنشینی اولیه و ثانویه هستند

۲-۷-۲- کالبراسیون دینامیک

پس از انجام کالبراسیون استاتیک، فرآیند کالبراسیون دینامیک انجام می‌شود. کالبراسیون دینامیک به صورت هم‌زمان برای پارامترهای سیستم لجن فعال و پارامترهای مدل تنشینی ثانویه صورت گرفته است. در کالبراسیون دینامیک برخلاف کالبراسیون دینامیک مدل برای مدت‌زمان طولانی‌تر و با

جدول ۳- پارامترهای کالیراسیون استاتیک و مقادیر پیش فرض و بازه تغییرات آنها (Keskitalo and Leiviskä, 2012; Borzooei et al., 2019)

پارامترهای مدل تاکاس					ASMI پارامترهای				
بازه تغییرات	مقادیر پیش فرض	واحد	معرفی	پارامتر	بازه تغییرات	مقادیر پیش فرض	واحد	معرفی	پارامتر
۴۵۰-۱۰۰	۲۵۰	$m \cdot d^{-1}$	سرعت ته‌نشینی حداکثر	$V_{s,max}$	۰/۷-۰/۵	۰/۶۷		ضریب بازده هتروتروفیک	Y_H
۵۵۰-۱۰۰	۴۷۴	$m \cdot d^{-1}$	سرعت ته‌نشینی حداکثر Vesilind	V_0	۰/۳-۰/۱	۰/۲۴		ضریب بازده اتوتروفیک	Y_A
۰/۰۰۰۱-۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۵۷۶	$m^3 \cdot (g SS)^{-1}$	پارامتر بازدارنده ته‌نشینی	r_h	۰/۰۵-۰/۲	۰/۰۸	-	نسبت تبدیل بیومس به ذرات معلق	f_P
۰/۰۰۰۱-۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۲۸۶	$m^3 \cdot (g SS)^{-1}$	پارامتر انعقاد	r_p	۰/۰۴-۰/۵	۰/۰۸۶		نسبت جرم نیتروژن به جرم COD در بیومس	i_{XB}
۰/۰۰۱-۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۲۲۸	-	درصد مواد غیر قابل ته‌نشینی	f_{ns}	۰/۰۳-۰/۸	۰/۰۶		نسبت جرم نیتروژن به جرم COD در محصولات تولیدی از بیومس	i_{XP}
پارامترهای مدل اوترپل- فروند					۷-۲	۶		نرخ رشد مخصوص حداکثر هتروتروفها	μ_H
بازه تغییرات	مقادیر پیش فرض	واحد	معرفی	پارامتر	۰/۷-۰/۲	۰/۶۲		نرخ زوال هتروتروفها	b_H
۰/۹۹-۰/۱	۰/۶۵	-	فاکتور اصلاحی برای بازدهی حذف	f_{corr}	۱/۵-۰/۳	۰/۸		نرخ رشد مخصوص حداکثر اتوتروفها	μ_A
۰/۰۰۱-۰/۰۱	۰/۰۰۷	-	نسبت جریان لجن به جریان ورودی	f_{PS}	۰/۰۲-۰/۳	۰/۲		نرخ زوال اتوتروفها	b_A
۰/۹۵-۰/۱	۰/۵	-	درصد قابل ته‌نشینی سوبستره معلق دیرتخریب‌پذیر	f_{SX}	۱/۵-۰/۲	۰/۵	$g NO_3 m^{-3}$	ضریب نیمه اشباع نترات برای هتروتروفهای فرآیند دنیتریفیکاسیون	K_{NO}
۰/۰۴۲-۰/۳	۰/۸۵	-	نسبت COD معلق به کل COD	f_X	۲۲-۳	۲۰	$g COD m^{-3}$	ضریب نیمه اشباع برای هتروتروفها	K_S
ضرایب COD و نرخ هوادهی تانک هوازی					۰/۴-۰/۱	۰/۲		ضریب نیمه اشباع اکسیژن برای هتروتروفها	$K_{O,H}$
بازه تغییرات	مقادیر پیش فرض	واحد	معرفی	پارامتر	۰/۶-۰/۱	۰/۴		ضریب نیمه اشباع اکسیژن برای اتوتروفها	$K_{O,A}$
۰/۱-۰/۰۱	۰/۰۷		COD تخریب‌ناپذیر (محلول)	S_I	۱/۵-۰/۲	۱	$g NH_3 m^{-3}$	ضریب نیمه اشباع آمونیوم برای اتوتروفها	K_{NH}
۰/۵-۰/۰۵	۰/۲۶		سوبستره زود تخریب‌پذیر (محلول)	S_S	۰/۹-۰/۲	۰/۸	-	فاکتور اصلاحی برای رشد آنوکسیک هتروتروفها	η_g
۰/۵-۰/۰۵	۰/۱۶	$gCOD.m^{-3}$	COD تخریب‌ناپذیر (معلق)	X_I	۰/۰۲-۰/۱	۰/۰۸	$m^3(gCOD day)^{-1}$	نرخ آمونیفیکاسیون	k_a
۰/۸-۰/۲	۰/۴۷		سوبستره دیر تخریب‌پذیر (معلق)	X_S	۵-۱	۳	$g slowly biodeg. COD (g cell COD day)^{-1}$	نرخ هیدرولیز ویژه حداکثر	k_h
۰/۱۵-۰	۰/۰۳		بیومس هتروتروف	$X_{B,H}$	۰/۰۱-۰/۱	۰/۰۳		ضریب نیمه اشباع برای هیدرولیز سوبستره کندتخریب‌پذیر	K_X
۲۰۰-۱۰	۱۰۰	day^{-1}	نرخ هوادهی تانک هوازی	KL_a	۰/۹-۰/۲	۰/۴	-	فاکتور اصلاحی برای هیدرولیز آنوکسیک	η_h

۳- منطقه مورد مطالعه

نهر اکسیداسیون کاروسل است که در آن ضمن حذف اکسیژن خواهی زیستی (BOD)، نیترات زایی- نیترات زدایی و حذف هوازی به طور هم‌زمان انجام می‌شود. مدول ۵ و ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران شامل تصفیه مقدماتی، تصفیه بیولوژیکی، تصفیه لجن و تصفیه بیوگاز تولیدی از خط لجن است. در شکل ۴ نمای کلی مدول‌های ۵ و ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران ارائه شده است.

تصفیه‌خانه جنوب تهران در جنوب شهر ری قرار دارد که دارای هشت مدول است. هر مدول با جمعیت تحت پوشش ۵۲۵۰۰۰ نفر و جمعا ۴۲۰۰۰۰۰ نفر احداث شده است (Sadri Moghaddam and Pirali, 2021). بخش موردنظر در این تحقیق مدول ۵ و ۶ است که روش تصفیه بیولوژیکی فاضلاب آن به صورت

۱-۳- داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز

برای توسعه و کالیراسیون مدل تصفیه‌خانه فاضلاب اطلاعات مختلفی مانند مشخصات طراحی و بهره‌برداری، خصوصیات مدل بیولوژیکی و ته‌نشینی، داده‌های بهره‌برداری و عملکردی مورد نیاز است (Petersen et al., 2002). داده‌های طراحی با مراجعه به اطلاعات طراحی هر تصفیه‌خانه به سادگی قابل دسترسی است. داده‌های بهره‌برداری نیز به‌طور معمول در تصفیه‌خانه فاضلاب به‌صورت ساعتی و روزانه اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند. در این

تحقیق از داده‌های ۹۰ روز (تیر، مرداد و شهریور ماه) تصفیه‌خانه برای هر متغیر استفاده شده است (۹۰ داده برای هر متغیر) که برای کالیراسیون استاتیک از میانگین داده‌های روزانه اندازه‌گیری شده در تصفیه‌خانه جنوب تهران در تیرماه سال ۱۳۹۸ و برای کالیراسیون دینامیک از داده‌های روزانه اندازه‌گیری شده در تصفیه‌خانه جنوب تهران در مرداد و شهریور سال ۱۳۹۸ استفاده شده است. در جدول ۴ مشخصات کمی و کیفی فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه فاضلاب و پساب خروجی از آن به همراه داده‌های عملکردی ارائه شده است.



شکل ۴- نمای مدول‌های ۵ و ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران

جدول ۴- مشخصات کمی و کیفی فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه فاضلاب و پساب خروجی از آن

متغیرها	تعریف	واحد	فاضلاب ورودی		پساب خروجی	
			مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار
Q	دبی	m ³ /d	۱۴۵۰۰±۲۰۰۰	۲۳۱۰/۱	۲۵۸۱/۵	۱۳۶۰۰±۲۰۰۰
T	دما	°C	۲۵±۱۵	۶/۷	-	-
pH	-	-	۷	۰	-	-
COD	میزان اکسیژن خواهی شیمیایی	mg/L	۵۵۰±۱۵۰	۹۷/۷	۶/۸	۲۱±۱۰
TSS	مواد جامد معلق	mg/L	۱۷۰±۳۰	۴۶/۷	۲/۴	۹±۵/۵
NH ₃	آمونیاک	mg/L	۷۲±۱۲	۸/۶	۲/۹	۱۴±۳/۵
TN	نیتروژن کل	mg/L	۷۷±۸	۹/۴	۳/۱۲	۱۶/۳±۴
متغیرها	تعریف	واحد	داده‌های عملکردی		انحراف معیار	
HRT	زمان ماند هیدرولیکی	h	۱۳±۳		۱/۳۲	
SRT	زمان ماند سلولی	days	۱۳±۴		۱/۱	
X	مواد جامد معلق مایع مخلوط	mg/L	۳۰۰۰±۶۰۰		۲۲۰/۱	

۴- نتایج و بحث

۴-۱- کالیبراسیون استاتیک

در جدول ۵، مقادیر متغیرهای کالیبراسیون براساس پارامترهای کالیبره شده برای هر دو سناریو ارائه شده است. در مقایسه کلی تابع هدفهای هر سناریو، همان طور که مشخص است به یک باره کالیبره کردن پارامترها ممکن است خطای برخی از متغیرهای خروجی ته نشینی اولیه مانند COD را کاهش و برخی دیگر مانند TSS را افزایش دهد. همان طور که مشخص است، در سناریوی اول میزان TSS خروجی از ته نشینی اولیه در تابع هدف 1 scenario (OF1) به ۲۵ درصد و در تابع هدف 1 scenario (OF2) به ۳۴ درصد رسیده است. این در حالی است که در سناریوی دوم با انجام کالیبراسیون مرحله ای میزان خطای این متغیر کاهش یافته و به صفر درصد رسیده است و می توان با اطمینان وارد مرحله بعدی شد. همچنین، میزان COD خروجی از ته نشینی اولیه در هر دو سناریو در محدوده ی قابل قبول قرار گرفته است و دارای خطای زیر ۴٪ است. با مقایسه دو سناریو، مشخص است که انجام کالیبراسیون مرحله ای (سناریو دوم)، میزان خطا را به شدت کاهش می دهد و

وضعیت واقعی تری را از شرایط موجود در تصفیه خانه نشان می دهد. همان طور که مشخص است در سناریوی اول میزان خطای تجمعی برای متغیرهای در نظر گرفته شده در تابع هدف یک 1 scenario (OF1) ۹۴٪ و در تابع هدف دوم 1 scenario (OF2) به ۶۷٪ رسیده است. این در حالی است که در سناریوی دوم همین مقادیر به ترتیب به ۳۹٪ و ۱۳٪ رسیده است.

هم چنین در مقایسه توابع هدف در هریک از سناریوها، با در نظر گرفتن تعداد بیشتر متغیر، میزان خطای تجمعی کل متغیرها کاهش یافته است، اگرچه ممکن است میزان خطای تجمعی متغیرهای تابع هدف کم باشد. علت این امر آن است که هرچه تعداد بیشتری متغیر در تابع هدف در نظر گرفته شود، سیستم به طور کلی دارای خطای کمتری است و وضعیت مدل به واقعیت تصفیه خانه نزدیک تر است. این در حالی است که با کمتر گرفتن تعداد متغیرها، اگرچه میزان خطا برای متغیرهای در نظر گرفته شده در تابع هدف کم می شود. ولی سایر متغیرها که در تابع هدف نیستند، دارای خطای بیشتری هستند و شرایطی به وجود می آید که به خوبی شرایط واقعی تصفیه خانه را مدل نمی کند و همراه با خطای زیاد است.

جدول ۵- مقدار متغیرهای کالیبراسیون و درصد خطای آن در کالیبراسیون استاتیک

X	X _r	TSS primary	COD effluent	TN effluent	TSS primary	COD primary	خطای تجمعی همه متغیرها	خطای تجمعی متغیرهای تابع هدف	خطای متوسط متغیرهای تابع هدف	خطای متوسط همه متغیرها	زمان اجرای برنامه
کالیبراسیون سناریوی اول											
۲۲۲۹	۳۲۸۰	۸	۱۸/۳	۱۵	۸۹	۳۱۵	-	-	-	-	مقدار مشاهداتی
۱۷۷۰ (٪۲۱)	۳۵۱۶ (٪۷)	۷ (٪۱۳)	۱۸ (٪۲)	۱۱ (٪۲۷)	۱۱۱ (٪۲۵)	۳۰۸ (٪۲)	٪۹۴	٪۹۴	٪۱۳	٪۱۳	تابع هدف ۱
۲۳۶۷ (٪۶)	۴۷۰۶ (٪۴۳)	۸ (٪۰)	۱۷ (٪۷)	۲۰ (٪۳۳)	۱۲۰ (٪۳۴)	۳۰۰ (٪۴)	٪۱۱۶	٪۶۷	٪۱۶	٪۱۳	تابع هدف ۲
کالیبراسیون سناریوی دوم											
۱۸۱۰ (٪۱۹)	۳۵۹۹ (٪۱۰)	۸ (٪۰)	۱۸ (٪۲)	۱۵ (٪۰)	۸۹ (٪۰)	۳۱۵ (٪۰)	٪۳۹	٪۳۹	٪۸	٪۸	تابع هدف ۱
۲۱۰۵ (٪۰/۰۴)	۴۱۸۲ (٪۲۸)	۷ (٪۱۳)	۱۸ (٪۲)	۱۵ (٪۰)	۸۹ (٪۰)	۳۱۵ (٪۰)	٪۴۱	٪۱۳	٪۴	٪۸	تابع هدف ۲

دوم فقط یک مجموعه پارامتر تعریف شده است. با مقایسه پارامترهای اوتریپول فروند در دو سناریو مشخص است که دو پارامتر f_{sx} و f_x تقریباً ثابت بوده و تغییری نکرده اند. هم چنین با مقایسه ضرایب COD مشخص است که در هر سناریو مجموعه پارامترهای متفاوتی تنظیم شده اند که نشان دهنده حساسیت

جدول ۶ اطلاعات مربوط به مقادیر پارامترهای کالیبراسیون را نشان می دهد، همان طور که در جدول مشخص است، برای پارامترهای اوتریپول فروند و ضرایب COD، در کالیبراسیون سناریوی اول دو مجموعه پارامتر برای 1 scenario (OF1) و 1 scenario (OF2) معرفی شده است، در حالی که برای سناریوی

روند با مقایسه OF2 در دو سناریو مشاهده می‌شود که پارامترهای f_p ، Y_H ، N_H ، K_S ثابت هستند و تغییری نکرده‌اند.

هم‌چنین با مقایسه تابع هدف‌های سناریوی اول به‌طور جداگانه مشخص است که تعداد بیشتری پارامتر (۷ پارامتر) از لحاظ مقداری مشابه هم می‌شوند و این به‌خاطر روندی است که در این مسیر طی می‌شود. در واقع با کالیبره کردن مرحله‌ای از آن‌جا که به سمت جواب خوب مدل هدایت می‌شود و میزان خطای آن در خروجی ته‌نشینی ثانویه در هر کدام کمتر است، بنابراین تعداد پارامتری بیشتری شبیه به هم هستند. همین روند را نیز در سناریوی دوم می‌توان مشاهده کرد، با این تفاوت که ۵ پارامتر ASM1 شبیه به هم هستند.

بالای مدل به این پارامترها است و تنظیم آن تاثیر بسیار زیادی در نتایج مدل دارد.

درحالی‌که دلتواز (۱۳۹۶) در تحقیق خود فقط پارامترهای Y ، k_d ، k_0 و K_S را در شرایط بهره‌برداری تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک اکباتان تهران در مدل ASM1 مورد ارزیابی قرار داده است، در این تحقیق به‌منظور مقایسه پارامترهای ASM1 در دو سناریو، از یک تابع هدف در هر دو سناریو استفاده کرده است. لذا از آن‌جا که متغیرهای تابع هدف یکسان است، بنابراین انتظار می‌رود که متغیرهای زیادی مقادیرشان مانند یکدیگر باشند که از جمله آن‌ها می‌توان به K_S ، N_H ، n_{y_g} ، k_a و Y_H اشاره کرد. همین

جدول ۶- مقدار پارامترهای کالیبره‌شده در هر مرحله از کالیبراسیون استاتیک

کالیبراسیون سناریوی دوم					کالیبراسیون سناریوی اول						
(OF) _{primary}	پارامترهای اوت‌ریپول فروند	OF2	OF1	پارامترهای ASM1	OF2	OF1	پارامترهای اوت‌ریپول فروند	OF2	OF1	پارامترهای ASM1	
۰/۸۶	f_{corr}	۵/۲۷	۷	μ_H	۰/۲۴	۰/۱	f_{corr}	۷	۵/۴	μ_H	
۰/۹۵	f_{PS}	۳	۲۲	K_S	۰/۵	۷۱/۷۳	f_{PS}	۳	۲۲	K_S	
۰/۰۰۱	f_{SX}	۰/۱	۰/۴	OH	۰/۰۱	۰/۰۱	f_{SX}	۰/۴	۰/۱	OH	
۰/۰۴	f_X	۰/۱۹	۰/۴	K_{NO}	۰/۰۴	۰/۰۴	f_X	۰/۱	۰/۱	K_{NO}	
(OF) _{primary}	ضرایب COD	۰/۶۹	۰/۲۸	b_H	OF2	OF1	ضرایب COD	۰/۴۲	۰/۲	b_H	
		۱/۵	۱/۵	μ_A				۰/۳	۰/۶۷	μ_A	
۰/۰۱	S_I	۱/۵	۱/۴۵	N_H	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	S_I	۱/۵	۱/۵	N_H	
۰/۲۶	S_S	۰/۱	۰/۵۶	K_{OA}	۰/۰۷	۰/۰۷	S_S	۰/۶	۰/۶	K_{OA}	
۰/۰۵	X_I	۰/۱۷	۰/۳	b_A	۰/۰۷	۰/۴۱	X_I	۰/۰۲	۰/۰۲	b_A	
۰/۲	X_S	۰/۵	۰/۵	n_{y_g}	۰/۲۷	۰/۳۱	X_S	۰/۷	۰/۵	n_{y_g}	
۰/۱۵	$X_{B,H}$	۰/۱	۰/۱	k_a	۰	۰/۲۰	$X_{B,H}$	۰/۰۲	۰/۱	k_a	
OF2	OF1	پارامترهای مدل تاکاس	۱/۹۸	۱/۵۶۸	k_h	OF2	OF1	پارامترهای مدل تاکاس	۱	۱/۰۰۲	k_h
			۰/۰۱	۰/۰۱	K_X				۰/۰۱	۰/۰۱	K_X
۱۰۰	۲۸۹/۶	$V_{S,max}$	۰/۹	۰/۳۴	n_{y_h}	۲۰۰	۱۰۰	$V_{S,max}$	۰/۲	۰/۲	n_{y_h}
۱۷۰	۱۰۰	V_0	۰/۷	۰/۵۱	Y_H	۵۳۶/۲	۱۰۰	V_0	۰/۷	۰/۵	Y_H
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱	r_h	۰/۳	۰/۲۸	Y_A	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	r_h	۰/۲۰	۰/۳	Y_A
۰/۰۰۹	۰/۰۸	r_p	۰/۲	۰/۲	f_p	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	r_p	۰/۲	۰/۱۲۶	f_p
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	f_{ns}	۰/۰۴	۰/۰۹	i_{XB}	۰/۰۱	۰/۰۰۱	f_{ns}	۰/۵	۰/۳۴	i_{XB}
			۰/۰۳	۰/۶۷۱	i_{XP}				۰/۸	۰/۸	i_{XP}

۴-۲- کالیبراسیون و صحت‌سنجی دینامیک

در جدول ۷، مقادیر پارامترهای کینتیک مدل لجن فعال، پارامترهای مدل ته‌نشینی ثانویه و ضرایب COD به‌دست‌آمده از کالیبراسیون دینامیک ارائه شده است.

در شکل ۵ نتایج اجرای دینامیک مدل با پارامترهای کالیبره‌شده نهایی ارائه شده است. در این شکل، ۸ روز اول به

با توجه به دو سناریوی معرفی‌شده در بالا، از آن‌جا که بهترین تابع هدف مربوط به تابع هدف اول از سناریوی دو است و میزان خطای تجمعی همه متغیرهای آن ۳۹٪ است، از مقادیر پارامترهای کالیبره‌شده به‌عنوان مقدار اولیه کالیبراسیون دینامیک استفاده شده‌اند.

تعیین شده است. در ادامه ۱۴ روز بعدی به‌عنوان داده‌های ورودی کالیبراسیون و ۸ روز به‌عنوان داده ورودی برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شده است.

اصطلاح برای گرم‌شدن^{۱۴} مدل یا تطبیق شرایط اولیه مدل با شرایط واقعی در نظر گرفته شده است. تعداد روزهای موردنیاز برای گرم‌شدن یا آمادگی مدل بسته به مدل طراحی شده می‌تواند بسیار متفاوت باشد که مقدار ۸ روز براساس آزمایش اولیه مدل

جدول ۷- مقدار پارامترهای کالیبره‌شده در کالیبراسیون دینامیک

ضرایب COD			پارامترهای کینتیک ASM1		
			کالیبراسیون دینامیک	واحد	پارامتر
کالیبراسیون دینامیک	واحد	پارامتر	۸	day^{-1}	$\hat{\mu}_H$
۰/۰۰۹	gCOD.m ⁻³	S _I	۰/۶۴		b_H
۰/۴۵		S _S	۰/۱		$\hat{\mu}_A$
۰/۰۴۵		X _I	۰/۳		b_A
۰/۳۶		X _S	۰/۸		K_{NO}
۰/۱۴		X _{B.H}	۱	K_S	
پارامترهای مدل تاکاس			۰/۵	$g O_2 m^{-3}$	$K_{O.H}$
			۰/۱		$K_{O.A}$
کالیبراسیون دینامیک	واحد	پارامتر	۰/۲	$g NH_3 m^{-3}$	K_{NH}
۱۰۰	$m \cdot d^{-1}$	$V_{S,max}$	۰/۲۹	-	η_g
۱۰۹	$m \cdot d^{-1}$	V_0	۰/۰۲	$m^3 (gCOD day)^{-1}$	k_a
۰/۰۰۰۱	$m^3 \cdot (g SS)^{-1}$	r_h	۰/۵	$g slowly biodeg. COD (g cell COD day)^{-1}$	k_h
۰/۰۰۹	$m^3 \cdot (g SS)^{-1}$	r_p	۰/۳		K_X
۰/۰۰۲	-	f_{ns}	۰/۹	-	η_h

برخوردار نیستند، زیرا برخی از نقاط حداکثری COD خروجی در ورودی‌هایی رخ داده است که در شرایط عادی قرار دارند. تجربه نشان‌دهنده است که معمولاً علت وجود مقادیر حداکثر در COD به‌علت کمبود اکسیژن در تانک‌های هوادهی است که به‌علت عدم وجود داده‌های کافی نمی‌توان این شرایط بهره‌برداری را دقیقاً در مدل لحاظ کرد.

نتایج به‌دست‌آمده با نتایج سایر مطالعات مشابه است. (Sadri Moghaddam and Pirali (2021) در مطالعه خود پس از انجام کالیبراسیون میزان ARE را برای متغیرهای BOD، COD، TSS و TN به ترتیب ۰/۱۳/۲۵، ۰/۱۴/۰۲، ۰/۱۴/۶۳ و ۱۴/۱۸۸ به‌دست آوردند. میزان ARE برای متغیرهای COD و N-NH₄ در مطالعه Vitanza et al. (2016b) به ترتیب ۱۲/۱۸۸ و ۳۰/۷ به‌دست آمد. در مطالعه‌ای که Chen et al. (2020) انجام دادند، میزان ARE برای متغیرهای COD، N-NH₄، TN و TP به ترتیب ۰/۴/۷۲، ۱۸/۱۸۷، ۹/۴۵ و ۳۸/۱۱ به‌دست آمد.

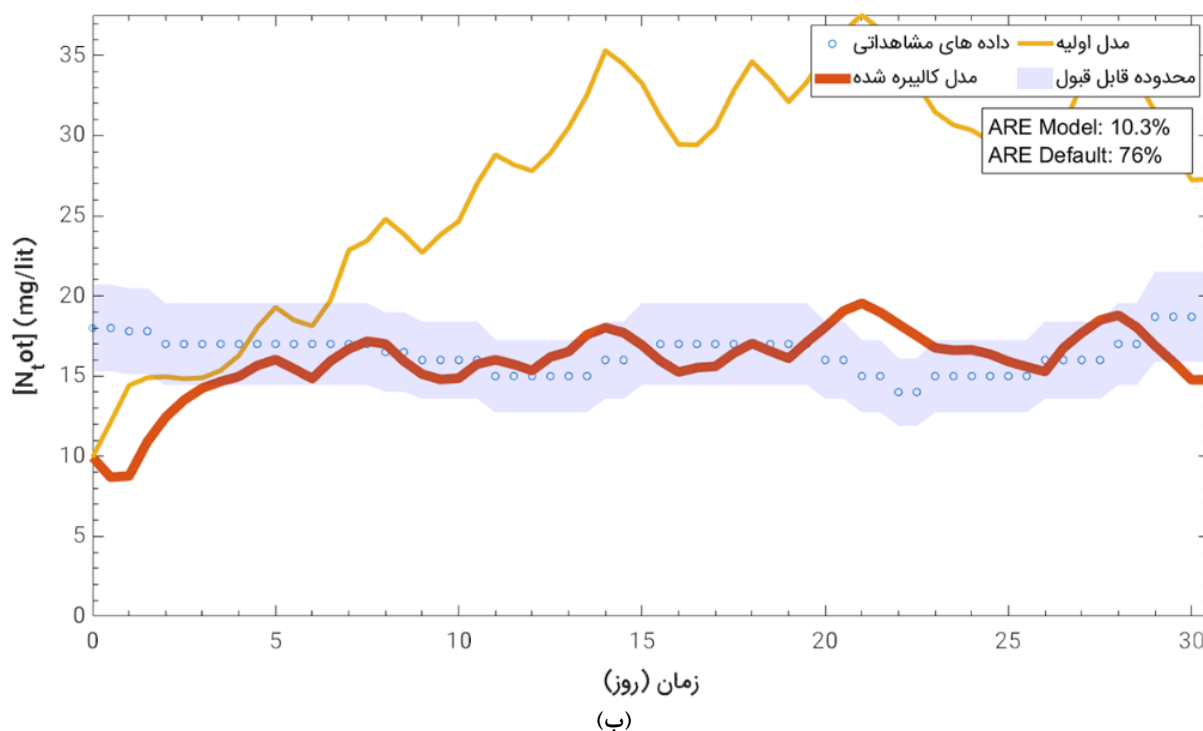
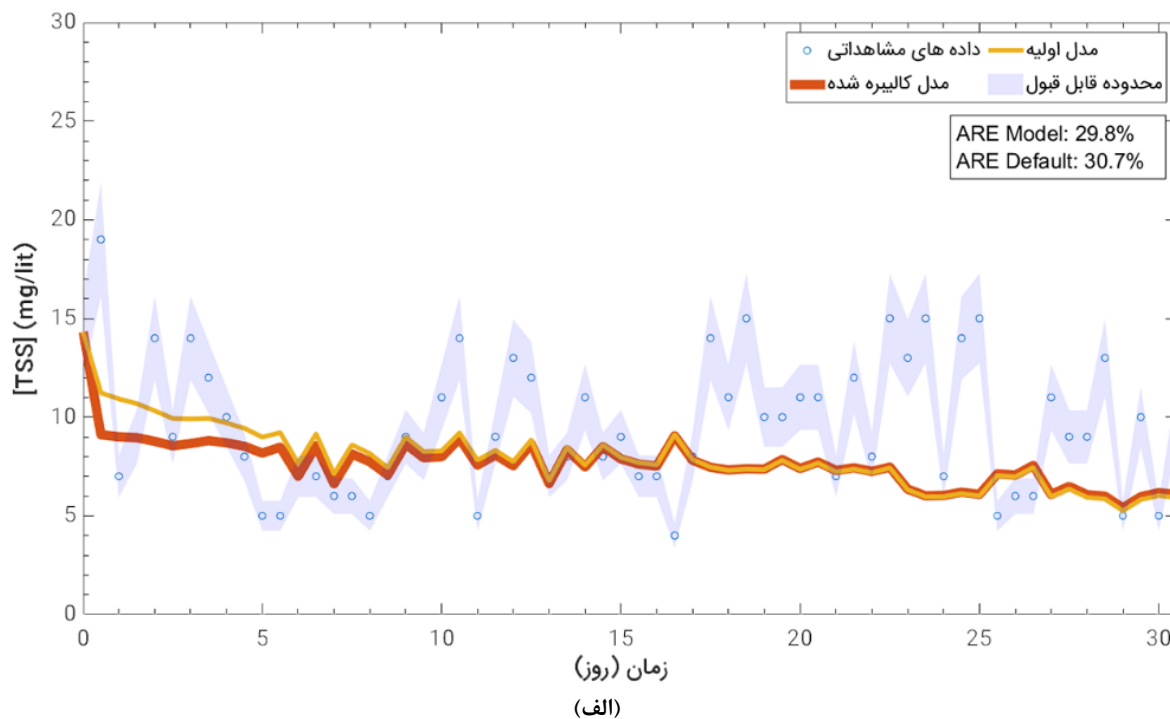
۵- جمع‌بندی

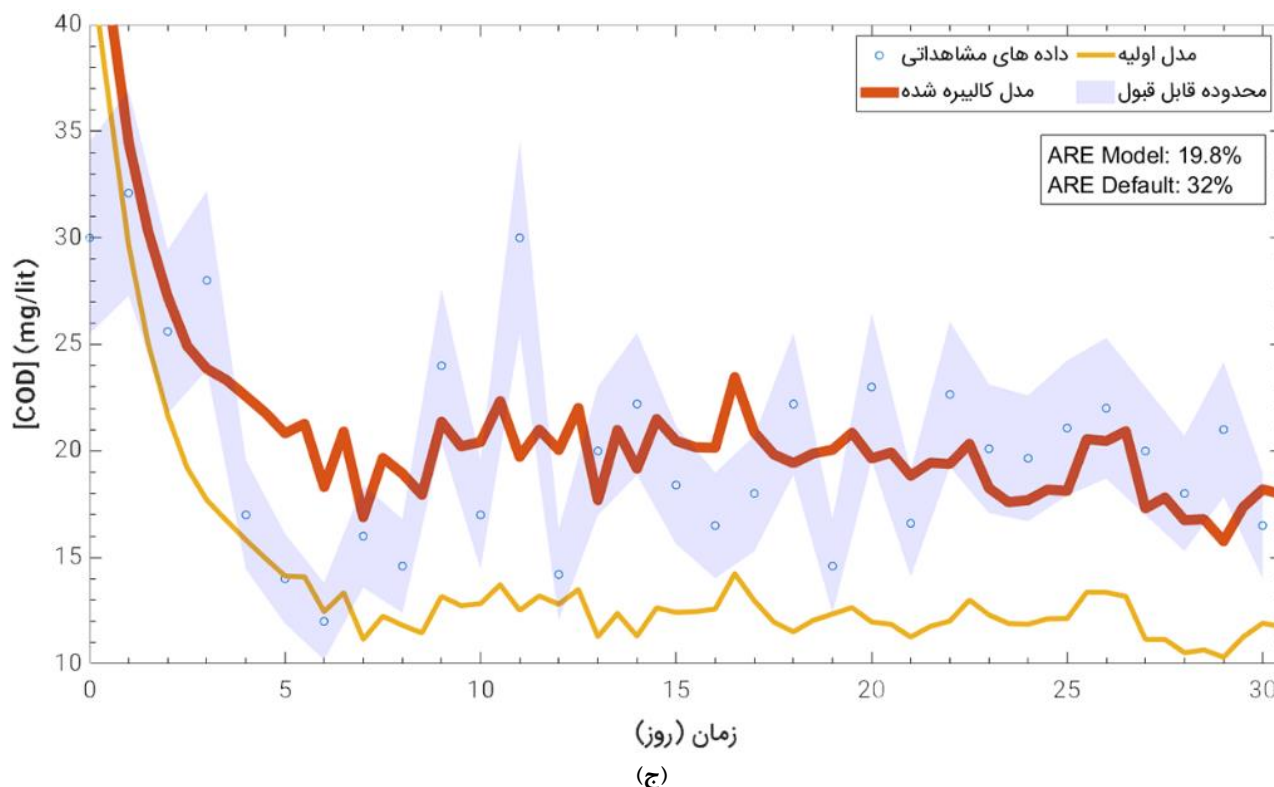
هدف از این تحقیق، بررسی سناریوهای مختلف برای رسیدن به

در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود که به‌علت ثابت در نظر گرفتن پارامترهای مرتبط با متغیر TSS شامل پارامترهای تانک ته‌نشینی اولیه و ضرایب COD در کالیبراسیون دینامیک، این متغیر به‌درستی از رفتار دینامیک تصفیه‌خانه پیروی نمی‌کند. گرچه به‌علت کالیبراسیون استاتیکی اولیه مدل با خطای متوسط ۳ میلی‌گرم در لیتر قادر به پیش‌بینی این متغیر است. با توجه به نمودارهای متغیرهای COD و TN ضرایب COD تعیین‌شده در مرحله کالیبراسیون استاتیک اولیه قابل‌قبول بوده‌اند که نشان‌دهنده کارآمدی کالیبراسیون اولیه است. اما برای بهبود پیش‌بینی TSS یا باید در بخش استاتیک معیار اعتبارسنجی از یک روز ثابت به داده‌های کالیبراسیون دینامیک تغییر باید و یا این پارامترها در بخش دینامیک نیز لحاظ شوند. در شکل ۵-ب کاهش خطای پیش‌بینی نیتروژن کل از ۷۶ درصد در مدل اولیه (با پارامترهای پیش‌فرض) به ۱۰/۳ درصد در مدل کالیبره‌شده مشاهده می‌شود. در شکل ۵-ج خطای پیش‌بینی COD مدل کالیبره‌شده تقریباً ۲۰ درصد است. کالیبره کردن COD چالش برانگیزترین بخش کالیبراسیون مدل بوده است، زیرا این متغیر از پارامترهای زیادی تاثیر می‌پذیرد. از سوی دیگر طبق بررسی‌های انجام‌شده، ظاهراً داده‌های COD مشاهداتی از دقت بالایی

TSS و TN پساب خروجی، COD و TSS خروجی واحد ته‌نشینی اولیه، و متغیرهای فرعی شامل غلظت مواد معلق لجن برگشتی (X_r) و میزان مواد معلق فرار (X) در نظر گرفته شده است. ابتدا کالیبراسیون تحت سناریو و توابع هدف مختلف انجام و پس از انتخاب بهترین سناریو و تابع هدف، کالیبراسیون دینامیک انجام شد.

کالیبراسیون مناسب است. بدین منظور، مدل BSM1 در نرم‌افزار سیمولینک برای شبیه‌سازی سیستم تصفیه نهراکسیداسیون کاروسل بازتوسعه داده شده است. پس از ساخت مدل، فرآیند کالیبراسیون تحت دو سناریوی متفاوت به صورت در نظر گرفتن همه پارامترها و در نظر گرفتن گام‌به‌گام مرحله‌ای پارامترها، هر یک تحت دو تابع هدف که نسبت به تحقیقات پیشین متفاوت است، انجام شد. در توابع هدف متغیرهای اصلی شامل COD،





شکل ۵- مقایسه نتایج متغیرهای کیفی پساب خروجی مدل در دو حالت پارامترهای پیش فرض و پارامترهای کالیبره شده دینامیک برای شبیه سازی ۳۰ روزه؛ الف) متغیر TSS؛ ب) متغیر TN؛ ج) متغیر COD

- 10- Total Suspended Solids
- 11- Chemical Oxygen Demand
- 12- Total Nitrogen
- 13- Otterpohl and Freund
- 14- Warm Up

۷- مراجع

اسدی آسیابدری، ف.، نصرتی، م.، و احمدی، م.، (۱۳۹۴)، "مدل سازی سیستم های تصفیه فاضلاب: مطالعه موردی مدل سازی تصفیه خانه پساب پالایشگاه تهران با نرم افزار Biowin"، اولین کنفرانس ملی توسعه پایدار در سیستم های مهندسی انرژی، آب و محیط زیست، تهران.

دلنواز، م.، (۱۳۹۶)، "استفاده از مدل های ریاضی تعیین ضرایب سینتیکی رشد میکروارگانیسم ها برای ارزیابی کارایی تصفیه خانه های فاضلاب"، مجله مهندسی بهداشت محیط، ۳(۳)، ۲۵۷-۲۶۸.

رجایی، م.، (۱۳۹۹)، "ارتقاء عملکرد تصفیه خانه فاضلاب با هدف کاهش هزینه های بهره برداری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

رجایی، م.، و نظیف، س.، (۱۳۹۶)، "بهبود تاب آوری تصفیه خانه فاضلاب با استفاده از سیستم کنترل هوادهی"، سومین کنگره

نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن تعداد بیشتری متغیر در تابع هدف کالیبراسیون، خطای تجمعی همه متغیرها کاهش می یابد. هم چنین به یک باره کالیبره کردن پارامترهای مدل همراه با خطای بیشتری نسبت به تنظیم گام به گام پارامترها در کالیبراسیون است که میزان خطای مدل را به میزان قابل توجهی تا ۸٪ کاهش می دهد. به منظور انجام کالیبراسیون دینامیک از بهترین مدل کالیبره شده استاتیک استفاده شده است. نتیجه نهایی به ترتیب در پیش بینی مقدار TSS، TN و COD خطای متوسط ۳۰، ۱۰ و ۲۰ درصد دارد که این عملکرد با توجه به محدودیت داده ها، بسیار مناسب است.

۶- پی نوشت

- 1- Benchmark Simulation Model no.1
- 2- Good Modeling Practice
- 3- Mixed Liquor Suspended Solids
- 4- Dutch Foundation of Applied Water Research
- 5- Protocol of Biomath department in ghent university
- 6- Water Environment Research Foundation, North America
- 7- Protocol written by a group of university members from Germany, Austria and Switzerland
- 8- Activated Sludge Model no.1
- 9- Particle Swarm Optimization

- ASDM model", *Journal of Water Process Engineering*, 31, 100819, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100819>.
- Gernaey, K.V., Van Loosdrecht, M.C.M., Henze, M., Lind, M., and Jørgensen, S.B., (2004), "Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: State of the art" *Environmental Modelling and Software*, 19(9), 763-783, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.03.005>.
- Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A., and Brdjanovic, D., (2019), "Biological wastewater treatment: Principles, modeling and design", *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design*, IWA Publishing, UK, <https://doi.org/10.2166/9781780408613>.
- Hulsbeek, J.J., Kruit, J., Roeleveld, P., and van Loosdrecht, M.C.M., (2002), "A practical protocol for dynamic modelling of activated sludge systems", *Water Science and Technology*, 45(6), 127-136.
- Hvala, N., Vrečko, D., Bordon, C., (2018), "Plant-wide modelling for assessment and optimization of upgraded full-scale wastewater treatment plant performance", *Water Practice and Technology*, 13(3), 566-582, <https://doi.org/10.2166/wpt.2018.070>.
- Kim, S., Lee, H., Kim, J., Kim, C., Ko, J., Woo, H., and Kim, S., (2002), "Genetic algorithms for the application of Activated Sludge Model No. 1", *Water Science and Technology*, 45(4-5), 405-411, <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0636>.
- Lindblom, E., Jeppsson, U., and Sin, G., (2020), "Identification of behavioural model input data sets for WWTP uncertainty analysis", *Water Science and Technology*, 81(8), 1558-1568, <https://doi.org/10.2166/wst.2019.427>.
- Noophan, P., Rodpho, R., Sonmee, P., Hahn, M., and Sirivitayaphakorn, S., (2018), "Nutrient removal performance on domestic wastewater treatment plants (full scale system) between tropical humid and cold climates", *Applied Environmental Research*, 40(2), 32-39, <https://doi.org/10.35762/aer.2018.40.2.3>.
- Otterpohl, R., and Freund, M., (1992), "Dynamic models for clarifiers of activated sludge plants with dry and wet weather flows", *Water Science and Technology*, 26(5-6), 1391-1400, <https://doi.org/10.2166/wst.1992.0582>.
- Petersen, B., Gernaey, K., Henze, M., and Vanrolleghem, P.A., (2002), "Evaluation of an ASM1 model calibration procedure on a municipal-industrial wastewater treatment plant", *Journal of Hydroinformatics*, 4(1), 15-38, <https://doi.org/10.2166/hydro.2002.0003>.
- Qasim, S.R., (1999), *Wastewater treatment plants: Planning, design, and operation*, Second Edition, Routledge, United States, <https://doi.org/10.1201/9780203734209>.
- Rieger, L., Gillot, S., Langergraber, G., Ohtsuki, T., Shaw, A., Takacs, I., and Winkler, S., (2012), *Guidelines for using Activated Sludge Models EWA Task Group on Good Modelling Practice*, (Vol. 9781843391), IWA Publishing, UK.
- Sadri Moghaddam, S., and Pirali, M., (2021), "Modeling علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
- رسولی، ر.، علافی اسکویی، ر.، غفارزاده، الف.، و سعادت پور، م.، (۱۴۰۱)، "بهینه‌سازی فرآیند هوادهی در تصفیه فاضلاب"، هجدهمین کنفرانس ملی پژوهش‌های نوین در علوم و مهندسی شیمی، بابل، ایران.
- رحیمی، ا.، و شکوهیان، م.، (۱۴۰۱)، "بهینه‌سازی چند هدفه فرآیند تصفیه فاضلاب توسط الگوریتم فرا ابتکاری GA-NIMBUS برپایه مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی (مطالعه موردی پایلوت A2O)"، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت محیط‌زیست، مازندران.
- رهنمافر، ف.، و شکوهیان، م.، (۱۴۰۰)، "بهینه‌سازی عملکرد سیستم تصفیه فاضلاب به‌روش وتلند توسط مدل‌سازی عددی (مطالعه موردی سه تصفیه‌خانه فاضلاب وتلند خراسان رضوی)"، بخش دوم: ارزیابی شبیه‌سازی، فاکتورهای اثرگذار و پیشنهادات اجرایی"، چهارمین همایش ملی فناوری‌های نوین در مهندسی معماری، عمران و شهرسازی ایران، تهران، ایران.
- کلیوند، ز.، و قاضی مرادی، ش.، (۱۳۹۹)، "بررسی عملکرد ارتقای فرآیندی تصفیه‌خانه فاضلاب شهر بندرعباس"، کنفرانس ملی مهندسی شیمی و نانوفناوری، خوزستان.
- Arnell, M., (2016), "Performance assessment of wastewater treatment plants, Multi-objective analysis using plant-wide models", Ph.D. Thesis, Lund University, Sweden.
- Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T., Siegrist, H., and Vavilin, V.A., (2002), "The IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)", *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 45(10), 65-73, <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>.
- Cao, J., Yang, E., Xu, C., Zhang, T., Xu, R., Fu, B., Feng, Q., Fang, F., and Luo, J., (2021), "Model-based strategy for nitrogen removal enhancement in full-scale wastewater treatment plants by GPS-X integrated with response surface methodology", *Science of the Total Environment*, 769, 144851, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144851>.
- Chen, W., Dai, H., Han, T., Wang, X., Lu, X., and Yao, C., (2020), "Mathematical modeling and modification of a cycle operating activated sludge process via the multi-objective optimization method", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104470, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104470>.
- Elawwad, A., Matta, M., Abo-Zaid, M., and Abdel-Halim, H., (2019), "Plant-wide modeling and optimization of a large-scale WWTP using BioWin's

- and calibration of a full-scale wastewater treatment plant using GPS-X model (A case study of Tehran)", *Numerical Methods in Civil Engineering*, 5(4), 67-76, <https://doi.org/10.52547/nmce.5.4.67>.
- Shahed Behrouz, M., Zhu, Z., Matott, L.S., and Rabideau, A.J., (2020), "A new tool for automatic calibration of the Storm Water Management Model (SWMM)", *Journal of Hydrology*, 581(2), 124436, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124436>.
- Takacs, I., Patry, G.G., and Nolasco, D., (1991), "A dynamic model of the clarification, Thickening process", *Water Research*, 25(10), 1263-1271.
- Tejaswini, E.S.S., Panjwani, S., Gara, U.B.B., and Ambati, S.R., (2021), "Multi-objective optimization based controller design for improved wastewater treatment plant operation", *Environmental Technology and Innovation*, 23, 101591, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101591>.
- Tomita, R.K., and Park, S.W., (2009), "Evolutionary multi-objective optimization of an activated sludge process", *Computer Aided Chemical Engineering*, 27(C), 747-752, [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70345-1](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70345-1).
- Zeferino, J.A., Antunes, A.P., and Cunha, M.C., (2009), "An efficient simulated annealing algorithm for regional wastewater system planning", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(5), 359-370, <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2009.00594.x>.



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