DOI: 10.22122/jhsr.v14i3.3402 Published by Vesnu Publications

تعیین مؤثرترین شاخص‌های راهبری لجن فعال و بررسی عملکرد فرایند در شرایط بارگذاری نامتعارف با استفاده از حل عددی ترکیبی مدل شبیه‌ساز معیار شماره ۱

حامد حسنلو[۱]، علی ترابیان[۲]، ناصر مهردادی[۲]، امیررضا کوثری[۳]، بهنوش امین‌زاده[۴]

مقاله پژوهشی

چکیده

مقدمه: هدف از کنترل تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، اتخاذ الگوریتمی است که در آن فرایند در شرایط عملیاتی مطلوبی کار کند و بدین منظور، به مدل ریاضی فرایند نیاز است. در مطالعه حاضر، پس از بیان مراحل ایجاد مدل شبیه‌ساز معیار شماره ۱ (Benchmark Simulation Model No. 1 یا BSM۱) به صورت گام به گام، روش‌های عددی مناسب برای حل مدل شبیه‌سازی ارایه و مؤثرترین شاخص فرایند جهت ارایه راهبردهای کنترلی مشخص شد و در نهایت، رفتار فرایند در برابر شرایط آب و هوایی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت.

روش‌ها: مقادیر اولیه درون رآکتورها و لایه‌های زلال‌ساز با حل معادلات حالت هر یک از رآکتورها محاسبه گردید. با استفاده از روش حل عددی ترکیبی Euler و Runge Kutta، مدل شبیه‌ساز BSM۱ در نرم‌افزار MATLAB ایجاد شد و با اعمال شرایط آب و هوایی مختلف، رفتار فرایندی تصفیه‌خانه مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: به کارگیری بیش از یک نوع روش حل عددی برای حل مدل شبیه‌سازی، به طور چشمگیری از حجم محاسبات اضافی و زمان می‌کاهد که این امر در کنترل‌کننده‌های پیش‌بین بسیار حایز اهمیت است. با اعمال راهبردهای کنترلی مختلف، به طور قطع نمی‌توان کیفیت تمام شاخص‌های فرایند را به یک میزان بهبود بخشید.

نتیجه‌گیری: شاخص‌های نیتروژن‌دار فرایند و به خصوص غلظت نیتروژن آمونیاکی، مؤثرترین شاخص راهبری فرایند لجن فعال محسوب می‌شود. این فرایند در برابر شرایط نامتعارف، حدود تخلیه استاندارد 5-day Biological Oxygen Demand (BOD_5)، Chemical Oxygen Demand (COD) و Total suspended solids (TSS) را با اختلاف معنی‌دار از حد تعیین شده رعایت می‌کند و تنها در شاخص نیتروژن تخطی وجود داشت. از مدل مفروض که برای نخستین بار در کشور ایجاد شده است، می‌توان برای مقاصد مختلف در زمینه‌های شناخت و راهبری فرایند بهره برد.

واژه‌های کلیدی: مدل شبیه‌ساز، فاضلاب، اغتشاش، راهبری، فرایند تصفیه

ارجاع: حسنلو حامد، ترابیان علی، مهردادی ناصر، کوثری امیررضا، امین‌زاده بهنوش. **تعیین مؤثرترین شاخص‌های راهبری لجن فعال و بررسی عملکرد فرایند در شرایط بارگذاری نامتعارف با استفاده از حل عددی ترکیبی مدل شبیه‌ساز معیار شماره ۱.** مجله تحقیقات نظام سلامت ۱۳۹۷؛ ۱۴ (۳): ۲۵۵-۲۴۷

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱/۱۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۴/۸ تاریخ چاپ: ۱۳۹۷/۷/۱۵

مقدمه

هدف فرایند تصفیه لجن فعال، دستیابی به پایین‌ترین مقدار غلظت مجاز آلاینده‌های قابل تجزیه زیستی و مواد مغذی در جریان خروجی، با صرف کمترین هزینه ممکن و حداقل مقدار لجن مازاد تولیدی است (۱). جهت رسیدن به این هدف، فرایند مذکور باید به دقت کنترل شود. از نقطه نظر عملی، امتحان و ارزیابی تمامی راهبردهای ارایه شده در مراجع علمی و تعیین میزان کارایی آن‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و حتی مقیاس واقعی، امری منطقی محسوب نمی‌شود. همان‌گونه که انتظار می‌رود تأثیر یک راهبرد کنترلی بر روی فرایند با بارگذاری‌های نامتعارف مختلف، متفاوت باشد؛ شوکی که برای آزمایش فرایند استفاده می‌شود نیز حایز اهمیت خواهد بود (۲). شبیه‌سازی، یک ابزار مقرون به صرفه را جهت ارزیابی در اختیار کاربران قرار می‌دهد، اما باید در نظر داشت که با توجه به جایگشت‌های متعدد شبیه‌سازی، نیاز به روش استانداردی جهت فراهم آمدن امکان مقایسه خواهد بود.

اولین منبع تخصصی در ارتباط با ایجاد مدل شبیه‌ساز معیار Benchmark Simulation Model (BSM) مربوط به گزارش فنی Henze و همکاران با عنوان مدل‌های لجن فعال (Activated sludge models یا ASM)، ASM۱، ASM۲، ASM۲d و ASM۳ بود (۳). معادلات این مدل‌های ریاضی تنها برای یک رآکتور تصفیه زیستی لجن فعال بیان شده‌اند. با توجه به ضرورت حضور تانک ته‌نشین‌کننده پس از فرایند لجن فعال، Takacs و همکاران به توضیح نحوه مدل‌سازی آن پرداختند. در پژوهش آن‌ها معادلات مربوط به یک زلال‌ساز ۱۰ لایه که تنها در راستای عمودی دارای پخش ذرات بود، معرفی گردید (۴). گزارش فنی «مدل شبیه‌ساز معیار شماره ۱» که توسط Alex و همکاران منتشر شد، منبع اصلی و تخصصی مورد استفاده جهت ایجاد مدل BSM۱ است (۲). پیش از این مرجع، گزارش‌های شماره ۶۲۴ و ۶۲۸ کارگروه Co-operation in the field of Scientific and Technical research

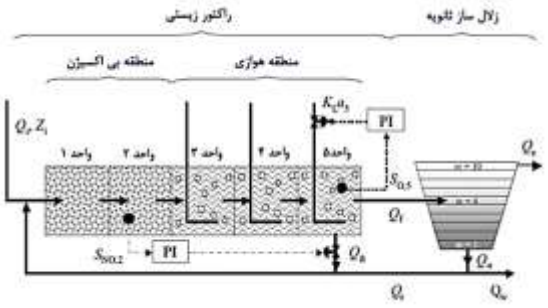
۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی هوا فضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۴- استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
نویسنده مسؤول: علی ترابیان
Email: atorabi@ut.ac.ir

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.17352363.1397.14.3.12.6]
[DOI: 10.22122/jhsr.v14i3.3402]

(COST) جهت ایجاد مدل فرایند استفاده می‌شد (۵). به دلیل برخی ابهامات در روند ایجاد مدل مفروض، پس از گزارش کارگروه International Water Association (IWA)، مطالعات متعددی توسط افراد مختلف انجام گرفت که به عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات Urena و همکاران با هدف بررسی رابط گرافیکی شبیه‌ساز مبتنی بر نرم‌افزار MATLAB برای کنترل تصفیه‌خانه فاضلاب (۶) و An و Hao با هدف مطالعه بر روی مدل‌سازی و شبیه‌سازی BSM۱ با نرم‌افزار MATLAB (۷) اشاره کرد. آخرین گزارش علمی- فنی کارگروه IWA با عنوان «راهبردهای کنترلی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب» علاوه بر مبانی علمی، خروجی‌های مدل‌های BSM در محیط تعدادی از نرم‌افزارها و زبان‌های برنامه‌نویسی ارایه گردید و مورد مقایسه قرار گرفت (۸). با توجه به ضرورت و در راستای تسهیل روند ایجاد مدل، از آن‌جایی که در این زمینه تاکنون در داخل کشور مطالعه‌ای صورت نگرفته است، در پژوهش حاضر توضیحات کاملی در رابطه با این مدل معیار ارایه و بعد از بیان نکات و روش گام به گام ایجاد BSM۱، نحوه تأثیر کنترلر Proportional Integral Controller (PI) بر روی شاخص‌های خروجی فرایند و کیفیت خروجی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. شاخص‌های مؤثر در راهبری فرایند تعیین و معرفی شد تا مسیر راهبردهای کنترلی در راستای آن‌ها باشد. دو مورد از مهم‌ترین ابهامات گزارش فنی IWA (شرایط اولیه درون راکتورها و لایه‌های مختلف زلال‌ساز و انتخاب حل‌کننده‌های مناسب روش‌های حل عددی در مراحل مختلف شبیه‌سازی) که در مراجع دیگر به آن‌ها پرداخته نشده است نیز پاسخ داده شد.

روش‌ها

مشخصات مدل BSM ۱ و اطلاعات مسأله: فرایند تصفیه مورد مطالعه متشکل از یک راکتور پنج قسمتی لجن فعال است که به صورت متوالی قرار گرفته‌اند. دو فرایند بی‌اکسیژن (واحدهای اول و دوم) و هوازی (واحدهای سوم تا پنجم) وظیفه تصفیه را به عهده دارند که مطابق با شکل ۱ با ضریب انتقال اکسیژن K_La تعریف می‌گردد (۸).



شکل ۱. نمای شماتیک Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM۱) (۸)

در ادامه مجموعه راکتورهای متوالی، یک زلال‌ساز ثانویه قرار گرفته است که در ۱۰ لایه مدل می‌گردد. مدلی که برای توصیف فرایند زیستی مورد استفاده قرار گرفته است، مدل ASM۱ می‌باشد که توسط کارگروه IWA ارایه شد (۳).

همچنین، مدل سرعت ته‌نشینی نمای دو بعدی که توسط Takacs و همکاران ارایه شده است، در زلال‌ساز ثانویه استفاده می‌شود (۴). حجم راکتورهای شماره ۱ و ۲ فرایند زیستی برابر با ۱۰۰۰ مترمکعب و راکتورهای ۳ تا ۵ برابر با ۱۳۳۳ مترمکعب و در نهایت، حجم زلال‌ساز ۶۰۰۰ مترمکعب می‌باشد. دبی جریان بازگردش داخلی، دبی جریان بازگردش خارجی، دبی جریان لجن مازاد دفعی و دبی جریان ورودی به راکتورها به ترتیب ۵۵۳۳۸، ۱۸۴۴۶، ۳۸۵ و ۱۸۴۴۶ مترمکعب در روز تعیین گردید. حداکثر ضریب انتقال اکسیژن در راکتورهای ۳ تا ۵، مقدار ۱۰ بر ساعت و سطح اکسیژن اشباع محلول در راکتوهای هوازی نیز مقدار ۸ گرم اکسیژن بر مترمکعب را دارد.

جریان ورودی: سه فایل آب و هوایی خشک، بارانی و طوفانی برای نمایش سه وضعیت اغتشاشی بر اساس اطلاعات عملکردی وضعیت واقعی تهیه شدند که از آدرس IWA قابل دسترسی می‌باشد (۹). در حالت وضعیت بارانی، دو بارش طولانی مدت در نظر گرفته شده است؛ اگرچه دبی جریان به سطح دبی جریان در حالت وضعیت طوفانی نمی‌رسد، اما طول مدت زمانی که دبی در این شرایط باقی می‌ماند بیشتر از شرایط آب و هوایی طوفانی است و بر خلاف آنچه در وضعیت طوفانی اتفاق می‌افتد، بار Chemical Oxygen Demand (COD) تصفیه‌خانه افزایش نمی‌یابد. در وضعیت طوفانی دو بارش با شدت زیاد و مدت زمان کم اتفاق می‌افتد. در طول مدت بارش دوم فرض بر این است که تمامی مواد تجمع یافته درون شبکه در زمان بارش اول تخلیه گردیده است و تنها افزایش متوسط در سطح COD وجود دارد.

شرایط اولیه: مدل فرایند لجن فعال شامل ۱۳ متغیر مستقل برای هر کدام از راکتورها می‌باشد. این مقادیر اولیه به منظور به کارگیری در روش انتگرال‌گیری عددی را می‌توان از حل حالت پایستار معادلات مربوط به آن برای هر یک از راکتورهای اختلاط کامل منفرد محاسبه نمود. سینتیک تمامی فرایندها به صورت مرتبه اول در نظر گرفته می‌شود که با این خطی‌سازی، معادلات موازنه جرم برای تمامی متغیرهای حالت درون راکتور هوادهی اختلاط کامل به صورت ماتریس شکل ۲ قابل نمایش خواهد بود. به علت این که در این شیوه، تعریف شرایط اولیه شبیه‌سازی غلظت اکسیژن درون راکتور اختلاط کامل هوادهی ثابت فرض گردید، میزان K_La مربوط به دستگاه هوادهی به عنوان متغیر مستقل و مجهول هشتم بردار متغیرهای حالت استفاده شده است (۳).

با حل معکوس ماتریس مفروض برای ۱۳ متغیر هر کدام از راکتورهای لجن فعال، مقادیر اولیه غلظت‌ها درون هر راکتور به دست می‌آید. در جدول ۱ مقادیر اولیه درون راکتورهای ۱ تا ۵ حاصل از حل معکوس ماتریس در حالت حلقه باز ارایه شده است. شاخص‌های محلول با نماد S و شاخص‌های جامد با نماد X مشخص شده‌اند. مقدارهای اولیه متغیرهای حالت درون لایه‌های مختلف زلال‌ساز نیز برابر با ستون آخر جدول مذکور که مربوط به راکتور پنجم است، در نظر گرفته می‌شود.

نماد D، نرخ رقیق‌سازی نامیده می‌شود که معادل معکوس زمان ماند است. این نرخ به دو صورت «نرخ رقیق‌سازی هیدرولیکی که مختص اجزای محلول است (Dh) و دیگری نرخ رقیق‌سازی ذرات که به اجزای جامد اختصاص دارد (Dx)، به صورت روابط ۱ و ۲ تعریف می‌شود.

$$D_h = Q.V^{-1}$$ رابطه ۱

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.17352363.1397.14.3.12.6]
[DOI: 10.22122/jhsr.v14i3.3402]

	بردار متغیرهای حالت													
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	
	S_I	S_S	X_I	X_S	X_{BH}	X_{BA}	X_P	K_La	S_{NO}	S_{NH}	S_{ND}	X_{ND}	S_{ALK}	
														بردار ورودی
۱	$-D_h$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	$-D_hS_{I,1}$
۲		$v_{21}K_1-D_h$		$v_{27}K_7$										$-D_hS_{s,1}$
۳			$-D_x$											$-D_hX_{I,1}$
۴				$v_{47}K_7-D_x$	$v_{44}b_H$	$v_{45}b_A$								$-D_hX_{s,1}$
۵					$v_{54}b_H-D_x$									$-D_hX_{BH,1}$
۶						$v_{65}b_A-D_x$				$v_{63}K_3$				$-D_hX_{BA,1}$
۷					$v_{74}b_H$	$v_{75}b_A$	$-D_x$							$-D_hX_{P,1}$
۸		$V_{81}K_1$						$O_{2sat}-S_O$		$v_{83}K_3$				$-D_h(S_{o,1}-S_o)$
۹									$-D_h$	$v_{93}K_3$				$-D_hS_{NO,1}$
۱۰		$V_{101}K_1$								$v_{103}K_3-D_h$	$v_{106}K_6$			$-D_hS_{NH,1}$
۱۱											$v_{116}-D_h$	$v_{118}K_8$		$-D_hS_{ND,1}$
۱۲					$v_{124}b_H$	$v_{125}b_A$						$v_{128}K_8-D_x$		$-D_hX_{ND,1}$
۱۳		$V_{131}K_1$								$v_{133}K_3$	$v_{136}K_6$		$-D_h$	$-D_hS_{ALK,1}$
						ماتریس حالت								

شکل ۲. ماتریس دستگاه معادلات حالت پایستار یک رآکتور هوادهی اختلاط کامل

به عنوان نمونه، ردیف ۶ به صورت مقابل خواهد بود.

$$v_{65}b_A\ X_{BA} - D_x\ X_{BA} + v_{63}K_3\ S_{NH} = -D_h\ X_{BA,1}$$

رابطه ۲

$$D_x = (SRT)^{-1}$$

انتخاب حل‌کننده‌های مناسب: روش‌های انتگرال‌گیری عددی متعددی برای حل معادلات دیفرانسیل معمولی (Ordinary Differential Equations یا ODEs) که حالت‌های پیوسته سیستم‌های پویا را توصیف می‌کنند، فراهم شده است.

جدول ۱. مقادیر غلظت‌های اولیه درون رآکتورهای ۱ تا ۵ حاصل از حل معکوس ماتریس متغیرهای حالت به حالت حلقه باز

متغیر حالت	نماد	ورودی تصفیه‌خانه	غلظت‌های اولیه متغیرهای حالت (میلی‌گرم در لیتر)				
			رآکتور ۱	رآکتور ۲	رآکتور ۳	رآکتور ۴	رآکتور ۵
مواد آلی خنثی محلول	S_I	۳۰/۰۰	۳۰/۰۰	۳۰/۰۰	۳۰/۰۰	۳۰/۰۰	۳۰/۰۰
سوبسترای قابل تجزیه سریع	S_S	۶۹/۵۰	۲/۸۱	۱/۴۶	۱/۱۵	۱/۰۰	۰/۸۹
مواد آلی خنثی جامد	X_I	۵۱/۲۰	۱۱۴۹/۱۳	۱۱۴۹/۱۳	۱۱۴۹/۱۳	۱۱۴۹/۱۳	۱۱۴۹/۱۳
سوبسترای قابل تجزیه کند	X_S	۲۰۲/۳۲	۸۲/۱۳	۷۶/۳۹	۶۴/۸۵	۵۵/۷۰	۴۹/۳۱
توده زیستی هتروتروفیک فعال	X_{BH}	۲۸/۱۷	۲۵۵۱/۸۰	۲۵۵۳/۳۹	۲۵۵۷/۱۳	۲۵۵۹/۱۸	۲۵۵۹/۳۴
توده زیستی اتوتروفیک فعال	X_{BA}	۰	۱۴۸/۳۹	۱۴۸/۳۱	۱۴۸/۹۴	۱۴۹/۵۳	۱۴۹/۸۰
مواد جامد حاصل از تجزیه توده زیستی	X_P	۰	۴۴۸/۸۵	۴۴۹/۵۳	۴۵۰/۵۲	۴۵۱/۳۱	۴۵۲/۲۱
اکسیژن	S_O	۰	۰	۰	۱/۷۲	۲/۴۳	۰/۴۹
نیتروژن به صورت نیتریت و نیترات	S_{NO}	۰	۵/۳۷	۳/۶۶	۶/۵۴	۹/۳۰	۱۰/۴۲
نیتروژن آمونیاکی	S_{NH}	۳۱/۵۶	۷/۹۲	۸/۳۴	۵/۵۵	۲/۹۷	۱/۷۳
نیتروژن آلی قابل تجزیه زیستی محلول	S_{ND}	۶/۹۵	۱/۲۲	۰/۸۸	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۶۹
نیتروژن آلی قابل تجزیه زیستی جامد	X_{ND}	۱۰/۵۹	۵/۲۸	۵/۰۳	۴/۳۹	۳/۸۸	۳/۵۳
قلیاییت	S_{ALK}	۷/۰۰	۴/۹۳	۵/۰۸	۴/۶۷	۴/۲۹	۴/۱۳
کل جامدات معلق	TSS	۲۱۱/۲۷	۳۲۸۵/۲۰	۳۲۸۲/۵۵	۳۲۷۷/۸۵	۳۲۷۳/۶۳	۳۲۶۹/۸۴

TSS: Total suspended solids

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.17352363.1397.14.3.12.6]

[DOI: 10.22122/jhsr.v14i3.3402]

حل‌کننده‌های گسسته نیز تنها شبیه‌سازی سیستم‌ها با مدل گسسته در گام زمانی بعدی را محاسبه می‌نماید. حل‌کننده ODE۴۵ یا Dormand-Prince از جمله حل‌کننده‌های با گام متغیر است که حالت مدل در گام زمانی بعدی را با استفاده از روش صریح Runge Kutta (۵، ۴) برای انتگرال‌گیری عددی محاسبه می‌کند؛ در حالی که ODE۱۵s یا Numerical differentiation Stiff/formulas (stiff/NDF) حالت مدل در گام زمانی بعدی را با استفاده از فرمول‌های دیفرانسیل عددی مرتبه متغیر NDFs محاسبه می‌کند. ODE۱۵s یک حل‌کننده چند مرحله‌ای می‌باشد. بنابراین، نیازمند حل‌های چندین گام زمانی قبلی برای محاسبه حالت فعلی است. با توضیحات ارایه شده، هنگام شبیه‌سازی مدل به حالت حلقه باز یا حلقه بسته با ورودی‌های ثابت، باید از حل‌کننده ODE۱۵s و در حالت حلقه بسته و یا استفاده از ورودی‌های دینامیک آب و هوایی و یا نویز فعال باید از حل‌کننده ODE۴۵ استفاده گردد. با این روش می‌توان از قابلیت‌های هر کدام از حل‌کننده‌ها بسته به موقعیت به طور هم‌زمان بهره برد (۱۰).

راهبردهای کنترلی و مشخصات تجهیزات کنترلی مورد استفاده:

دو راهبرد کنترلی در BSM۱ ارایه شده است. هدف در راهبرد کنترلی اول، تنظیم میزان اکسیژن محلول درون رآکتور پنجم هوازی لجن فعال روی مقدار ۲ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد که با استفاده از متغیر کنترل‌کننده ضریب انتقال اکسیژن انجام می‌شود. راهبرد کنترلی دوم، تنظیم مقدار غلظت نیترات درون رآکتور دوم بی‌اکسیژن لجن فعال روی مقدار ۱ میلی‌گرم در لیتر با استفاده از متغیر کنترل‌کننده خط لجن برگشت داخلی (Q_a) از رآکتور پنجم به ابتدای خط است (۱۱). جهت ساده‌سازی، رفتار کلیه متغیرهای تصمیم به صورت مطلوب در نظر گرفته می‌شود و کنترل‌کننده پیشنهاد شده، مدل معیار از نوع PI است. کلاس حسگر نیترات درون رآکتور دوم از نوع B0، دامنه اندازه‌گیری صفر تا ۲۰ گرم نیتروژن بر مترمکعب، T۱۰ و T۹۰ دارای مقادیر صفر و ۱۰ دقیقه، Ti و Tt به ترتیب ۰/۰۲۵ و ۰/۰۱۵ و پارامتر K نیز مقدار ۱۰۰۰۰ گرم نیتروژن بر مترمکعب در روز می‌باشد. همچنین، کلاس حسگر اکسیژن درون رآکتور پنجم از نوع A0، دامنه اندازه‌گیری صفر تا ۱۰ گرم COD بر مترمکعب، T۱۰ و T۹۰ دارای مقادیر صفر و ۱ دقیقه، Ti و Tt به ترتیب ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۱ و پارامتر K نیز مقدار ۲۵ گرم COD بر مترمکعب بر لیتر در روز است.

شاخص ارزیابی:

شاخص‌های عملکردی، مجموعه ارزیابی‌هایی است که به منظور تعیین میزان کارامدی راهبرد کنترلی اعمالی به سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص کیفیت جریان خروجی (Effluent Quality یا EQ) در قالب یک جزء مستقل، میزان آلاینده‌هایی که در جریان تصفیه شده خروجی وجود دارد و به منبع پذیرنده وارد می‌شود را بیان می‌کند. واحد آن کیلوگرم ماده آلاینده در روز است که با استفاده از روش انتگرال‌گیری مثلثی در طول هفت روز آخر شبیه‌سازی (روز ۲۱ تا ۲۸ که معادل روز ۷ تا ۱۴ هر کدام از فایل‌های ورودی است) محاسبه می‌گردد. شاخص مصرف انرژی پمپاژ (Pumping energy یا PE) و انرژی هوادهی (Aeration energy یا AE) نیز میزان انرژی مصرفی سیستم را بر حسب کیلووات ساعت در روز محاسبه می‌نماید. شاخص تولید لجن (Sludge production یا SP) برای میزان لجن مازاد تولیدی و شاخص برآیند هزینه (Overall cost index یا OCI) از شاخص‌های دیگر مورد استفاده هستند. روابط ۳ تا ۱۵ مربوط به شاخص‌های معرفی شده است (۱۲).

رابطه ۳
$$OCI = AE + PE + 5.SP + 3.EC + ME$$

رابطه ۴
$$EQ = \frac{1}{T\times 1000}\int_{t=21\ days}^{t=28\ days}\left(B_{SS}.TSS_e(t) + B_{COD}.COD_e(t) + B_{BOD5}.BOD5_e + B_{Nkj}.TKN_e(t) + B_{NO}.S_{NOe}(t)\right)Q_e(t).dt$$

رابطه ۵
$$PE = \frac{1}{T}\int_{t=21\ days}^{t=28\ days}(0.004.Q_a(t) + 0.008.Q_r(t) + 0.05.Q_w(t)).dt$$

رابطه ۶
$$AE = \frac{S_O^{sat}}{T.1.8.1000}\int_{t=21\ days}^{t=28\ days}\sum_{i=1}^{5}V_i.K_La_i(t).dt$$

رابطه ۷
$$SP = \frac{1}{T}\left(TSS_a(14days) - TSS_a(7days) + TSS_s(14days) - TSS_s(7days) + \int_{7days}^{14\ days}TSS_w.Q_w.dt\right)$$

رابطه ۸
$$EC = \frac{COD_{EC}}{T.1000}\int_{7days}^{14days}(\sum_{i=1}^{n}q_{EC}).dt$$

رابطه ۹
$$ME = \frac{24}{T}\int_{7days}^{14days}\sum_{i=1}^{5}[0.005.V_i \text{ if} K_La_i(t) < 20d^{-1} \text{ otherwise } 0]$$

رابطه ۱۰
$$TSS_e = 0.75(X_{Se} + X_{BH,e} + X_{BA,e} + X_{P,e} + X_{I,e})$$

رابطه ۱۱
$$COD_e = S_{S,e} + S_{I,e} + X_{S,e} + X_{I,e} + X_{BH,e} + X_{BA,e} + X_{P,e}$$

رابطه ۱۲
$$BOD_{5e} = 0.25(S_{S,e} + X_{S,e} + (1\text{-}f_P).(X_{BH,e} + X_{BA,e}))$$

رابطه ۱۳
$$TKN_e = S_{NH,e} + S_{ND,e} + X_{ND,e} + i_{XB}(X_{BH,e}+X_{BA,e}) + i_{XP}(X_{P,e}+X_{I,e})$$

رابطه ۱۴
$$N_{tot,e} = TKN_e + S_{NO,e}$$

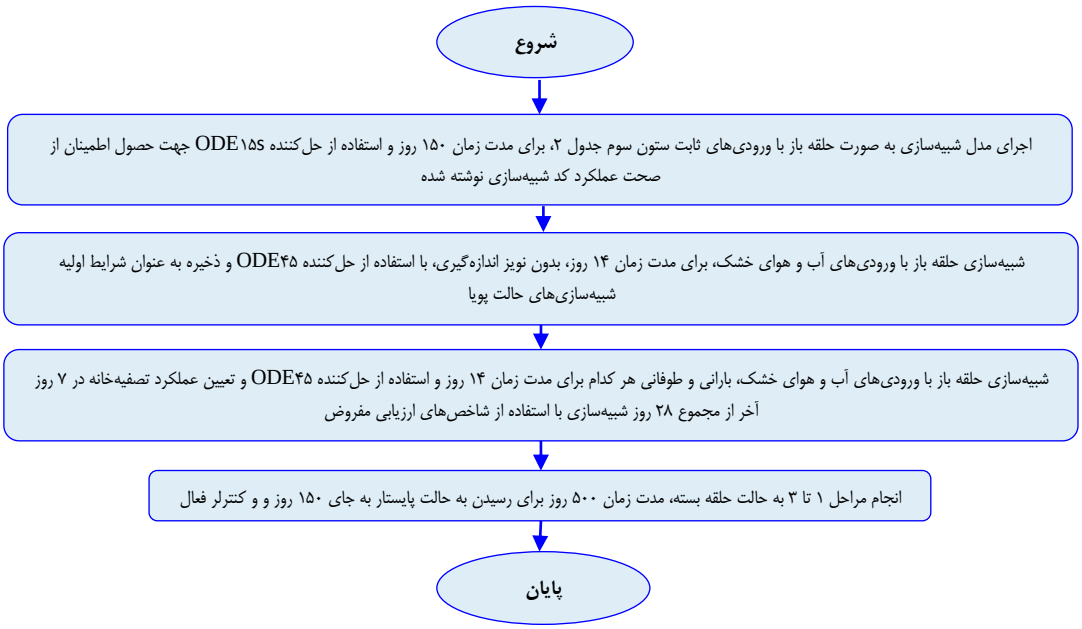
رابطه ۱۵
$$TSS_t = TSS_a + TSS_s$$

فاکتورهای وزنی B_{SS}، B_{COD}، B_{BOD5}، B_{TKN} و B_{NO} نیز به ترتیب دارای مقادیر ۲، ۱، ۲، ۳۰ و ۱۰ می‌باشد.

مراحل شبیه‌سازی:

در سیستم مورد نظر، حالت پایا از کارکرد فرایند با تعریف شرایط اولیه و شاخص‌های ورودی‌های ثابت در مدت زمانی نزدیک به ۱۵ برابر سن لجن درون فرایند که حدود ۱۵۰ روز است، حاصل خواهد شد (۱۳). بنابراین، مدل BSM۱ ایجاد شده برای این مدت زمان اجرا گردید و پس از کنترل خروجی‌ها با خروجی‌های دستورالعمل مربوط به آن و صحت عملکرد الگوریتم نوشته شده، از آن به عنوان شرایط اولیه شبیه‌سازی حالت پویا استفاده گردید. توضیحات مراحل انجام کامل شبیه‌سازی در شکل ۳ ارایه شده است. لازم به ذکر است که در حالت حلقه باز، متغیرهای کنترلی پیش‌فرض حالت حلقه بسته باید روی مقادیر ثابت به شرح Qa = ۵۵۳۳۸ مترمکعب در روز و $K_La(5)$ = ۳/۵ یک بر ساعت تنظیم شود.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.17352363.1397.14.3.12.6]
[DOI: 10.22122/jhsr.v14i3.3402]



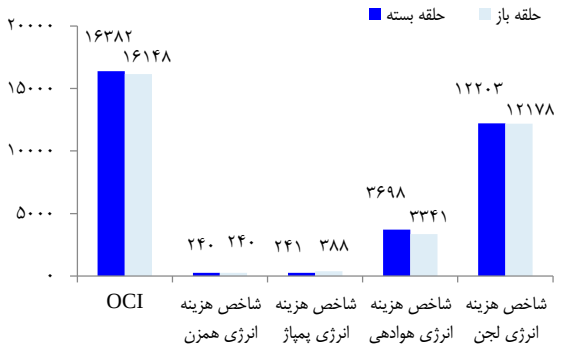
شکل ۳. الگوریتم مراحل انجام شبیه‌سازی مدل معیار Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM۱)

اجرای حالت حلقه باز به جهت ایجاد شناخت پاسخ گذرا یا دینامیک سیستم و حالت حلقه بسته نیز به منظور بررسی میزان کارایی و نحوه مقابله راهبرد کنترلی پیش‌فرض سیستم در برابر بارگذاری نامتعارف انجام می‌گیرد.

یافته‌ها

به جهت اهمیت و امکان بررسی رعایت استاندارد خروجی مقرر، در ابتدا متغیرهایی که به عنوان استاندارد خروجی تعیین شده‌اند و شامل COD، 5-day Biological Oxygen Demand (BOD_5)، Total suspended solids (TSS)، S_{NH} و Total nitrogen (TN) هستند، برای بررسی روند تغییرات انتخاب شدند. پس از استخراج اولین خروجی‌ها، مشاهده گردید که متغیرهای COD، BOD_5 و TSS در هر دو حالت استفاده از کنترلر و بدون حضور آن ضمن رعایت استاندارد، خروجی‌های مشابهی و با اندک تفاوت ارایه می‌کنند. بنابراین، مشخص شد که کنترلر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر دو شاخص TN و S_{NH} می‌گذارد. در ادامه مطالعه، روند تغییرات بر روی این دو شاخص متمرکز گردید. خط ممتد در نمودارها مربوط به حالت بدون حضور کنترلر و خط‌چین مربوط به حالت حضور کنترلر فعال است.

سناریوی ۱: آب و هوای خشک: پس از انجام دقیق مراحل فلوچارت ارایه شده در شکل ۳ که روند انجام ایجاد مدل را به طور واضح بیان می‌کند و محاسبه شاخص‌های مدل مفروض از فرمول‌های مربوط، مشاهده می‌گردد که بیشترین هزینه مرتبط با راهبری فرایند تصفیه‌خانه مربوط به تولید لجن است (شکل ۴). بنابراین، در انتخاب راهبرد کنترلی باید به این مورد توجه ویژه‌ای داشت. به جز شاخص هزینه پمپاژ، سایر شاخص‌ها افزایش نسبی داشتند. در برآیند شاخص‌های مفروض در OCI نیز افزایش نسبی حالت حلقه بسته به نسبت حالت حلقه مشاهده می‌گردد.



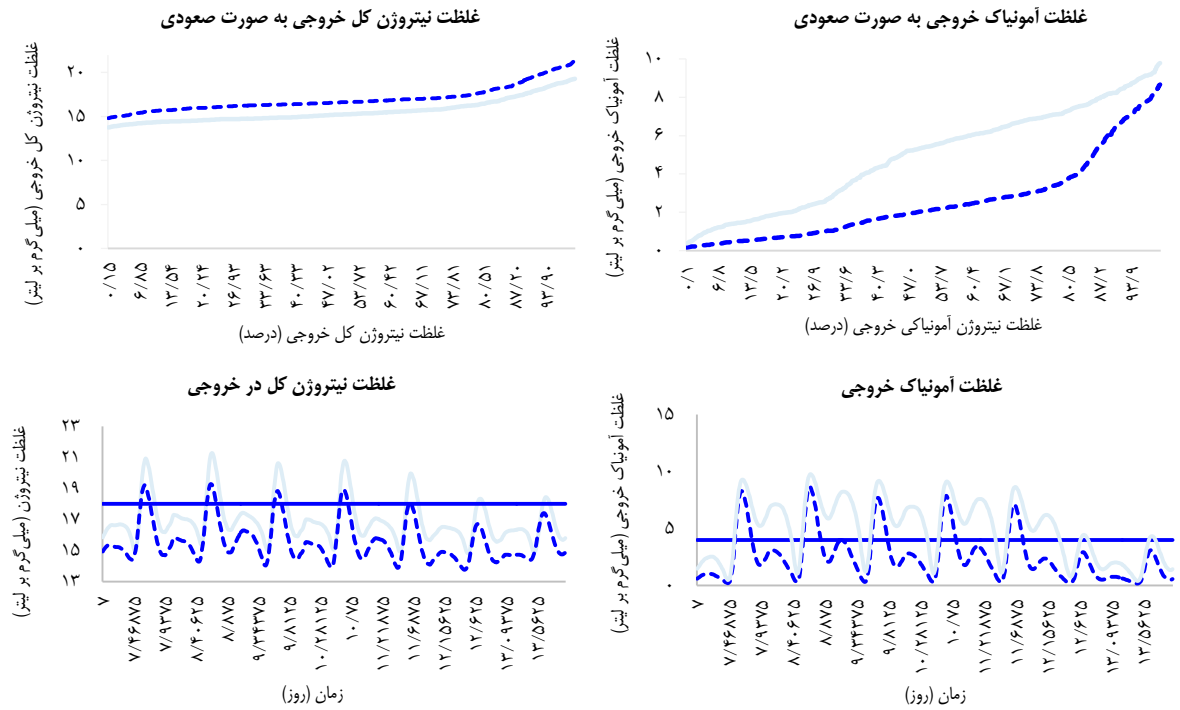
شکل ۴. مقایسه شاخص‌های هزینه بهره‌برداری محاسبه شده در حالت‌های حلقه باز و بسته سناریوی ۱

OCI: Overall cost index

بر اساس شکل ۵، غلظت نیتروژن آمونیاکی در ۹۵ درصد مواقع از مقدار ۸/۹ گرم نیتروژن در مترمکعب در حالت بدون کنترلر به مقدار ۷/۴ گرم نیتروژن در مترمکعب در حالت فعال بودن سیستم کنترل کاهش یافت. این امر در غلظت‌های پایین نیز مشهود بود. به عنوان مثال، در حالت عادی راهبری، در کمتر از ۵ درصد مواقع، غلظت نیتروژن آمونیاکی خروجی ۱ و کمتر بود؛ در حالی که این درصد با اعمال سیستم کنترلی به بیش از ۳۰ درصد ارتقا یافت که بسیار حایز اهمیت می‌باشد.

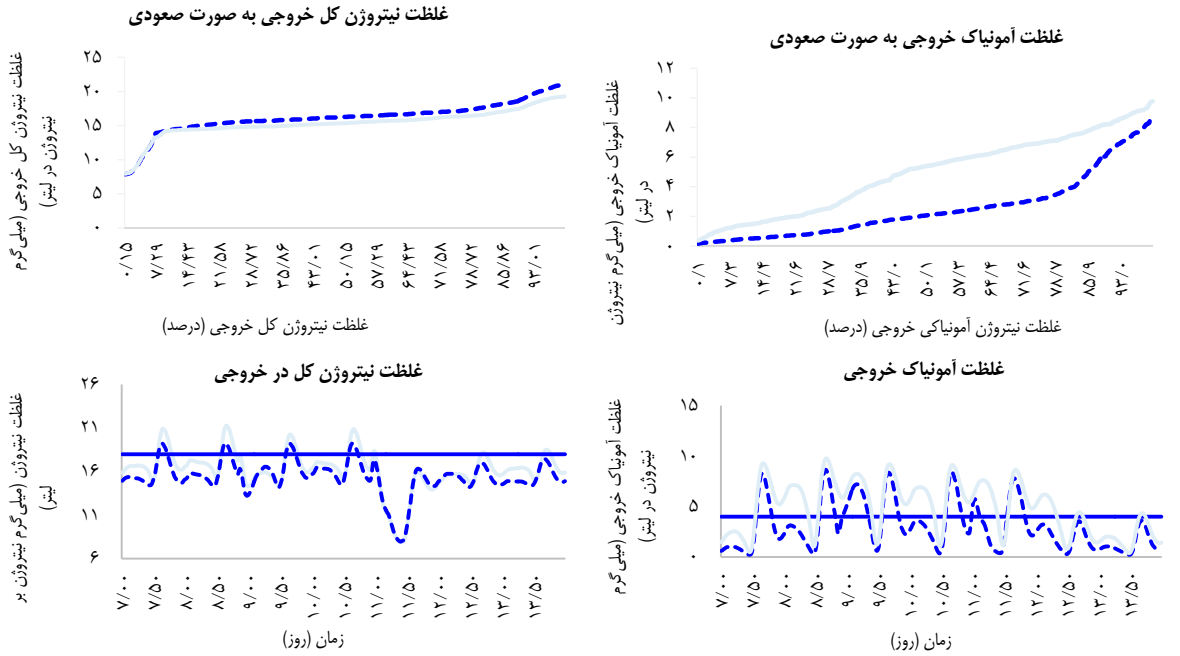
سناریوی ۲: آب و هوای طوفانی: مراحل شبیه‌سازی مشابه سناریوی قبل انجام شد و شکل۶ حاصل گردید. مانند حالت قبل، این مرتبه نیز دو شاخص به صورت عکس یکدیگر عمل می‌کنند. با این تفاوت که اختلاف بین حالت کنترلر فعال و عدم حضور آن روی پارامتر کل نیتروژن خروجی، اختلاف کمتری را از خود نشان داد.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.17352363.1397.14.3.12.6]
[DOI: 10.22122/jhsr.v14i3.3402]



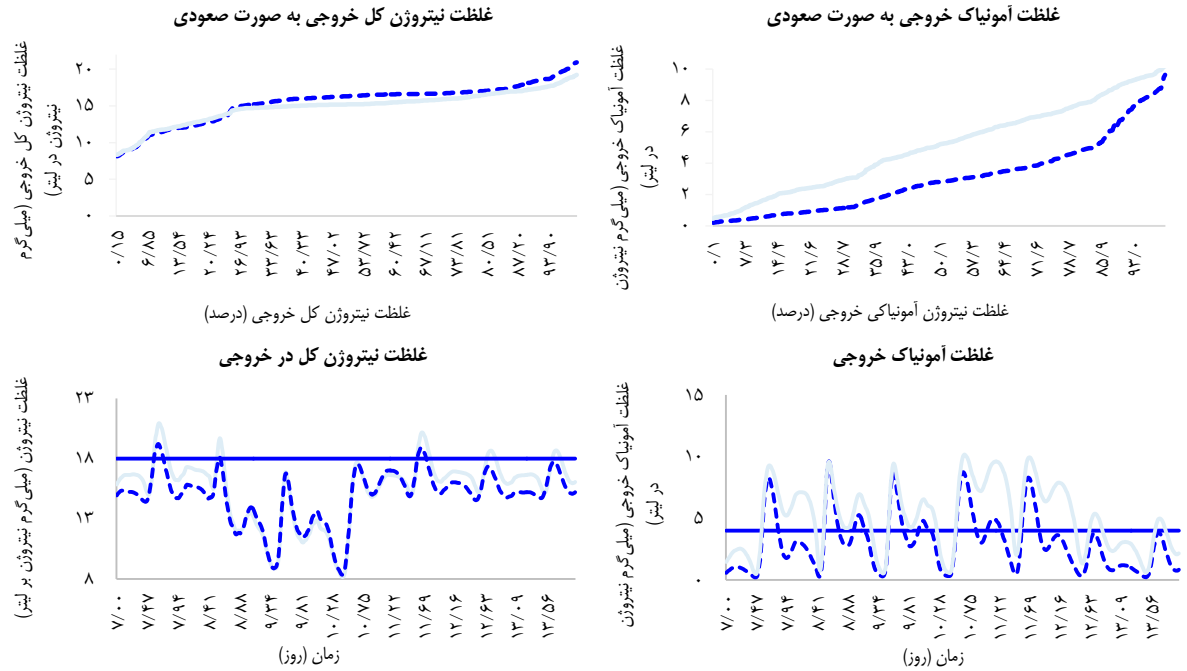
شکل ۵. خروجی‌های سناریوی آب و هوای خشک (خط ممتد برای حالت بدون کنترلر و خط‌چین با کنترلر است)

همچنین، نزدیکی و انطباق بیشتری بین دو نمودار مشاهده گردید. تعداد دفعاتی که جریان خروجی حد استاندارد را رد می‌کند، به نسبت حالت عدم حضور کنترلر دو مرتبه بیشتر است. در نقطه مقابل، تغییرات غلظت نیتروژن آمونیاکی قرار دارد که به تعداد ۵ مرتبه از دفعاتی که به دلیل عدم حضور کنترلر از حد مجاز تخطی صورت گرفته، کاسته شده است.



شکل ۶. خروجی‌های سناریوی آب و هوای طوفانی (خط ممتد برای حالت بدون کنترلر و خط‌چین با کنترلر است)

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.17352363.1397.14.3.12.6]
[DOI: 10.22122/jhsr.v14i3.3402]



شکل ۷. خروجی‌های سناریوی آب و هوای بارانی (خط ممتد برای حالت بدون کنترلر و خط‌چین با کنترلر است)

سناریوی ۳: آب و هوای بارانی: این سناریو جهت شبیه‌سازی یک بارندگی طولانی مدت در هفته دوم تعریف شده است. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، محتوای نیتروژن کل در حالت حلقه بسته بیشتر از حالت‌های قبلی به حالت حلقه باز نزدیک‌تر شده است و میزان تغییرات غلظت نیتروژن آمونیاکی از مقدار ۹/۵ به ۸ گرم نیتروژن در مترمکعب نیز قابل توجه می‌باشد. چهار پیک غلظت آمونیاکی به زیر حد استاندارد منتقل شد و تأثیر عکس بر روی محتوای کل نیتروژن هم انطباق بیشتری از خود نشان داد. در مورد محتوای نیتروژن کل بر خلاف دو سناریوی قبلی که نمودار کنترلر فعال همواره بالاتر از حالت بدون کنترلر بود، در ۲۵ درصد مواقع که مربوط به غلظت‌های پایین‌تر از ۱۵ گرم نیتروژن در مترمکعب است، جای دو نمودار عوض شده است و برای غلظت‌های بالاتر از ۱۵ گرم نیتروژن در مترمکعب، رفتاری مشابه با سناریوهای قبل مشاهده گردید.

بحث

تمام پژوهش‌ها در زمینه به کارگیری مجموعه مدل‌های BSM توسط متخصصان علم کنترل انجام شده است. از جمله تازه‌ترین تحقیقات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعه Santin و همکاران با هدف استفاده از کنترلر منطق فازی در کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای (۱۴) و پژوهش Qiao و همکاران با هدف استفاده از کنترل‌کننده شبکه عصبی فازی تطبیقی در راهبری چند هدفه تصفیه‌خانه‌ها (۱۵) اشاره کرد. حفظ فرایند در شرایط کاری معین و ثابت، به صرف انرژی و هزینه بیشتر نسبت به حالت بدون کنترل آن نیاز دارد. بنابراین، افزایش هزینه که در شرایط آب و هوایی خشک اختلافی در حدود ۱/۵ درصد در شاخص کلی دارد، باعث رعایت استاندارد خروجی و حفظ امنیت و سلامت منبع پذیرنده پساب تصفیه شده می‌شود. با توجه به شکل ۴، به کارگیری سیستم کنترلی اگرچه باعث بهبود و کاهش چشمگیر خروجی نیتروژن آمونیاکی گردید، اما در مورد کل نیتروژن خروجی تأثیر معکوسی داشت که البته در مقایسه با کاهش نیتروژن آمونیاکی، افزایش قابل توجهی مشاهده نشد.

به کارگیری سیستم کنترلی، تعداد دفعات تخطی از حد استاندارد را در مورد غلظت آمونیاک کاهش داد، اما به همین تعداد نیز منجر به افزایش عبور غلظت نیتروژن کل از حد مجاز استاندارد گردید. در شرایط آب و هوایی طوفانی، عملکرد فرایند در حذف آشفتگی سه شاخص COD، BOD_5 و TSS مطلوب بود و در تمام حالات، استاندارد خروجی رعایت شد و در برابر شوک‌های این سه شاخص مقاوم بود. بر اساس داده‌های شکل ۷، روند نزدیک شدن و انطباق نمودارهای نیتروژن کل در این حالت از دو سناریوی قبلی بیشتر است. بر خلاف حالت آب و هوای خشک، فاصله بین نقاط پیک کاهش یافت و علاوه بر این که کنترلر باعث بهبود عملکرد غلظت آمونیوم محلول شد، عملکرد آن روی غلظت کل نیتروژن نیز در مقایسه با حالت قبلی بهتر بود و تنها حدود ۱/۶ درصد افزایش شاخص OCI مشاهده گردید. نکته قابل توجه، عملکرد کنترلر روی دو شاخص نیتروژن آمونیاکی و کل نیتروژن در غلظت‌های کمتر از ۱۵ گرم نیتروژن در مترمکعب سناریوی آب و هوای بارانی بود. در ابتدا تصور می‌شد که شاید نتوان میزان این دو شاخص را به طور هم‌زمان با کنترلر فعال کاهش داد، اما با مشاهده این رفتار کنترلی، می‌توان تمرکز مطالعات را به ارایه راهبردهایی که هم‌زمان میزان دو شاخص را کاهش دهد، معطوف نمود.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.17352363.1397.14.3.12.6]
[DOI: 10.22122/jhsr.v14i3.3402]

نتیجه‌گیری

تاکنون مطالعاتی در زمینه استفاده از قابلیت مجموعه مدل‌های شبیه‌ساز BSM در ارایه راهبردهای کنترلی، امور راهبری تصفیه‌خانه‌ها و به کارگیری در امر شناخت فرایند تصفیه لجن فعال، در داخل کشور انجام نشده است. پژوهش حاضر از این جهت که جزییات ناگفته در امر ساخت مدل را پوشش داد و کلیه مراحل ایجاد مدل در آن به صورت گام به گام ارایه گردید، مرجع مناسبی برای انجام تحقیقات آینده خواهد بود. استفاده همزمان از روش‌های حل عددی Euler و Runge Kutta با حل‌کننده‌های ODE۱۵s و ODE۴۵ در مراحل مختلف حل مدل، علاوه بر افزایش سرعت، به میزان قابل توجهی از حجم محاسبات اضافی می‌کاهد. پس از ایجاد مدل در نرم‌افزار MATLAB، تأثیر به کارگیری سیستم کنترل خودکار تحت تأثیر شرایط نامتعارف آب و هوایی در قالب سه سناریو مورد بررسی قرار گرفت که نقش بسزایی در شناخت رفتار فرایند دارد. با مشاهده نمودارهای خروجی سناریوهای مختلف، برآیند تأثیر حضور کنترلر در مقابله با شرایط نامتعارف حالت‌های بارانی و طوفانی از حالت آب و هوای خشک ملموس‌تر بود و به کارگیری سیستم کنترل خودکار در کیفیت جریان تصفیه شده خروجی تأثیر انکارناپذیری داشت. از طرف دیگر، همواره نمی‌توان کیفیت تمامی عوامل دخیل در فرایند را به طور همزمان و یا به یک میزان بهبود داد و باید با بررسی سناریوهای راهبری مختلف و به کارگیری ابزار شبیه‌سازی، حالت بهینه را انتخاب نمود. با بررسی‌های صورت گرفته بر روی تمامی شاخص‌های دخیل در فرایند، مشخص گردید که تمرکز راهبردهای کنترلی پیشنهاد شده باید در راستای متغیرهای نیتروژن‌دار پساب به خصوص غلظت نیتروژن آمونیاکی باشد.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از رساله مقطع دکتری با شماره ۳۷۷۶۶۴/۸۴، مصوب دانشگاه تهران می‌باشد. بدین وسیله نویسندگان از زحمات سرکار خانم الهام بهرامیان و سرکار خانم سمیرا رنجبر که در راستای ارتقای کیفی مطالعه همکاری نمودند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آورند.

References

1. Pons MN, Spanjers H, Jeppsson U. Towards a benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plants by simulation. Comput Chem Eng 1999; 23: S403-S406.
2. Alex J, Benedetti L, Copp J, Gernaey KV, Jeppsson U, Nopens I, et al. Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1) [Online]. [cited 2008]; Available from: URL: https://www.iea.lth.se/publications/Reports/LTH-IEA-7229.pdf
3. Henze M, Grady L Jr, Gujer W, Marais VR, Matsuo T. Activated sludge model No 1. 29 ed. London, UK: International Association on Water Pollution Research and Control (IAWPRC); 1987.
4. Takacs I, Patry GG, Nolasco D. A dynamic model of the clarification-thickening process. Water Res 1991; 25(10): 1263-71.
5. Copp JB. The COST Simulation benchmark: Description and simulator manual (A product of COST Action 624 & COST Action 682). Brussels, Belgium: European Cooperation in Science and Technology; 2002.
6. Urena F, Alfaro VM, Arrieta O, Vilanova R. MATLAB based graphical interface simulator for wastewater treatment plant control by using the benchmark BSM1. Proceedings of the IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON); 2011 Apr. 4-6; Amman, Jordan.
7. An A, Hao X. Study on Modeling and Simulation of BSM1 with Matlab. In: Qian Z, Cao L, Su W, Wang T, Yang H, Editors. Recent Advances in Computer Science and Information Engineering. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media; 2012. p. 861-6.
8. Gernaey KV, Jeppsson U, Vanrolleghem PA, Copp JB. Benchmarking of control strategies for wastewater treatment plants. London, UK: IWA Publishing; 2014.
9. International Water Association. IWA task group on benchmarking of control strategies for WWTPs [Online]. [cited 2002]; Available from: URL: http://apps.ensic.inpl-nancy.fr/benchmarkWWTP
10. MathWorks. MATLAB for deep learning [Online]. [cited 2018]; Available from: URL: https://www.mathworks.com
11. Rieger L, Alex J, Gujer W, Siegrist H. Modelling of aeration systems at wastewater treatment plants. Water Sci Technol 2006; 53(4-5): 439-47.
12. Santin I, Pedret C, Vilanova R, Meneses M. Removing violations of the effluent pollution in a wastewater treatment process. Chem Eng J 2015; 279: 207-19.
13. Vanrolleghem PA, Jeppsson V, Carstensen J, CarIssont B, OIsson G. Integration of wastewater treatment plant design and operation-a systematic using cost functions. War Sci Tech 1996; 34(3-4): 159-71.
14. Santin I, Barbu M, Pedret C, Vilanova R. Fuzzy logic for plant-wide control of biological wastewater treatment process including greenhouse gas emissions. ISA Trans 2018; 77: 146-66.
15. Qiao JF, Hou Y, Zhang L, Han HG. Adaptive fuzzy neural network control of wastewater treatment process with multiobjective operation. Neurocomputing 2018; 275: 383-93.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.17352363.1397.14.3.12.6]

[DOI: 10.22122/jhsr.v14i3.3402]

DOI: *10.22122/jhsr.v14i3.3402* *Published by Vesnu Publications*

Journal of Health System Research **Vol. 14, No. 3, Autumn**

Received: 07.04.2018 Accepted: 29.06.2018 Published: 07.10.2018

Determination of the Most Effective Process Control Parameters of Activated Sludge, and Investigating the Process Performance in Unconventional Loading Using Hybrid Numerical Solution of Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1)

Hamed Hasanlou[1], Ali Torabian[2], Nasser Mehrdadi[2], Amir Reza Kosari[3], Behnoush Aminzadeh[4]

Original Article

Abstract

Background: The main goal of controlling urban wastewater treatment plants is to adopt an algorithm in which the process works in optimal operating conditions. For this purpose, we need to use the process mathematical model. In this study, the steps of building the Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1) were presented step by step. Appropriate numerical methods were proposed for solving the simulation model, and the most effective parameter of the process was determined to provide control strategies. Finally, behavior of the process was examined against different weather conditions.

Methods: The initial values inside the reactors and the clarifier layers were calculated by solving the state equations of each reactor. Using the Euler and Range Kutta hybrid numerical approach, the BSM1 simulating model was created in MATLAB environment. By applying different weather conditions, the behavior of the treatment process was investigated.

Findings: Applying more than one numerical solution to solve the simulation model reduced significantly the amount of additional calculus and time, as a very important item in predictive controlling systems. Make use of different control strategies, necessarily do not improve the quality of all process parameters.

Conclusion: Nitrogen-containing parameters, especially ammonia nitrogen, are the most effective control parameters in activated sludge process. This process complies effluents standard limits of chemical oxygen demand (COD), 5-day biological oxygen demand (BOD5), and total suspended solids (TSS) with significant difference. Only in nitrogen parameter, we see some violations of the standard. The model that is created for the first time in the country can be used for different purposes in the fields of process recognition and operation.

Keywords: Simulation model, Waste water, Disturbance, Leadership, Treatment process

Citation: Hasanlou H, Torabian A, Mehrdadi N, Kosari AR, Aminzadeh B. **Determination of the Most Effective Process Control Parameters of Activated Sludge, and Investigating the Process Performance in Unconventional Loading Using Hybrid Numerical Solution of Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1).** J Health Syst Res 2018; 14(3): 347-55.

1- PhD Candidate, Department of Environmental Engineering, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Professor, Department of Environmental Engineering, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Associate Professor, Department of Aerospace, School of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
4- Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
Corresponding Author: Ali Torabian, Email: atorabi@ut.ac.ir

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.17352363.1397.14.3.12.6]
[DOI: 10.22122/jhsr.v14i3.3402]