

Water and Wastewater, Vol. 35, No. 2, pp: 53-71

Optimization of Phosphate Removal in Industrial Wastewater Treatment Plant in SBR and MBBR Units

Mohammad Reza Fadaei Tehrani^{1*}, Pouria Jamshidipour²

1. Assist. Prof. and Faculty Member of Isfahan Higher Educational and Research Center, Energy Research Institute, Isfahan, Iran
(Corresponding Author) mfadaei@nri.ac.ir
2. Senior Expert and Researcher, Morchekhort Industrial Wastewater Treatment Plant, Isfahan, Iran

(Received March 3, 2024 Accepted May 21, 2024)

To cite this article:

Fadaei Tehrani, M. R. and Jamshidipour, P., 2024. Optimization of phosphate removal in industrial wastewater treatment plant in SBR and MBBR units. *Water and Wastewater*, 35(2), 53-71. <https://doi.org/10.22093/wwj.2024.446732.3405>.

Abstract

Nowadays, due to the increasing need for water, protection of water resources against pollution, especially prevention of dirt leakage and reuse of sewage, is one of the main priorities of societies, and extensive investment for sewage treatment has become inevitable. In this research, the simulation of the performance of the industrial wastewater treatment plant in the BioWIN software for the biological and chemical removal of phosphorus, and the change of the functional program of the sequential discontinuous reactor system in order to achieve the best efficiency, were carried out. According to the obtained results, in the SBR system, the best working conditions are found by combining the sludge return of 1.27 m³/day from the sedimentation tank to the anaerobic unit, converting the second series anaerobic units to the aerobic unit and injecting a nitrogen solution of 10 g/L with a flow rate of 1 m³/day; So that after two weeks, the amount of phosphate at the outlet of the refinery decreased to zero. In the MBBR system, any of the nitrogen source injection solutions, adequate aeration and alum injection can reduce the phosphate concentration in the effluent to zero. Nitrogen injection rate and sludge return percentage in SBR system and selection of appropriate dose of alum injection and aeration rate in MBBR system, are the key variables of wastewater treatment. In order to achieve the optimal conditions for phosphorus removal, the optimal limit of each of these main variables is selected by simulating and considering technical, executive and economic factors.

Keywords: Treatment, Industrial Wastewater, Sequencing-Batch-Reactor, Moving-Bed-Biofilm-Reactor, BioWIN, Phosphorus.



1. Introduction

Wastewater treatment and reducing its pollution to less than the permissible limits are among the main prerequisites for the sustainable development of societies (Obaideen et al., 2022). In addition, the increasing demand for water, due to the growth of population and industry, has prioritized the development of wastewater collection, treatment and recycling facilities in dry countries such as Iran (Tehrani et al., 2014).

Although various methods are used in wastewater treatment, due to reasons such as weakness in design and construction, insufficient knowledge of operation, use of inappropriate equipment or materials, and lack of spending on necessary expenses, in many cases of wastewater treatment plants the desired efficiency and the discharge of the effluent from them to water sources has caused problems. The presence of excessive amounts of nutrients such as nitrogen and phosphorus can cause problems such as excessive growth of algae and creating anaerobic conditions in the water environment in receiving sources (Rozić, 2022).

In this study, the performance simulation of the sewage treatment plant was carried out for two consecutive non-continuous reactor (Sequencing Batch Reactor¹) and extended hood (Moving Bed Biofilm Reactor²) treatment systems with simultaneous application. Also, in order to match the results with reality, the operation data of Morchekhort industrial wastewater treatment plant was used for modeling and analysis in the BioWIN software environment. The innovation of this article is to optimize the performance of the wastewater treatment plant in phosphate removal by providing a modification plan for SBR and MBBR units, and its results can be used to solve the problem of phosphate in the output effluent in different operating conditions with minimum cost and maximum ease.

2. Materials and methods

For this research, the characteristics and operating data of the Morchekhort industrial town of Isfahan were used. This treatment unit uses two separate continuous reactor systems and extensive aeration to treat industrial wastewater from factories located in the north of Isfahan. In the basic models, the dimensions of the units, the daily flow rate and the concentrations of the

selected pollutants were used as inputs. The COD, BOD₅, TSS, NO₃ and PO₄ parameters were selected from the data measured during the operation days, and other parameters required for simulation in the software were from authoritative articles and references and the experiences of the authors of the article.

In this study, after building the model, the results of the software were compared with the results of the operational and laboratory unit of MorcheKhort Industrial Estate, Isfahan, and the correctness of the model performance was evaluated. To reach the goals of this research, two modules were used to simulate the process performance of the refinery:

Module No. 1: Simulation of SBR system performance.

Module No. 2: Simulation of MBBR system performance.

3. Results and discussion

In this research, different scenarios of using enhanced biological phosphorus removal³, chemical phosphorus precipitation⁴ and changing the operating mode of current systems and their effect on improving phosphate removal were analyzed using dynamic simulation. The basic scenarios included the changes of phosphorus removal in the existing operating conditions based on 30-day dynamic simulation.

As shown in Fig. 1, according to the current operating status of the first module, the main condition for implementing the EBPR method is to return the sludge to the beginning of the anaerobic unit and to install an aeration unit after the anaerobic unit.

As shown in Fig. 2, in the fifth scenario, by injecting alum with a flow rate of 1000 l/day and a concentration of 57.7 g/L to the inlet of the first aerobic tank, the amount of phosphate at the outlet reached zero. Nitrogen deficiency was reported in both MBBR tanks and aeration in this case.

The results of the evaluation of different scenarios in the second module of the treatment plant showed that any of the solutions of nitrogen source injection to MBBR units and sufficient aeration and alum injection to the first aeration tank can reduce the phosphate concentration in the effluent to zero. Therefore, choosing any of the above conditions based on technical and economic studies can be done.

¹ Sequencing Batch Reactor (SBR)

² Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)

³ Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR)

⁴ Chemical Phosphorus of Precipitation Removal (CPPR)



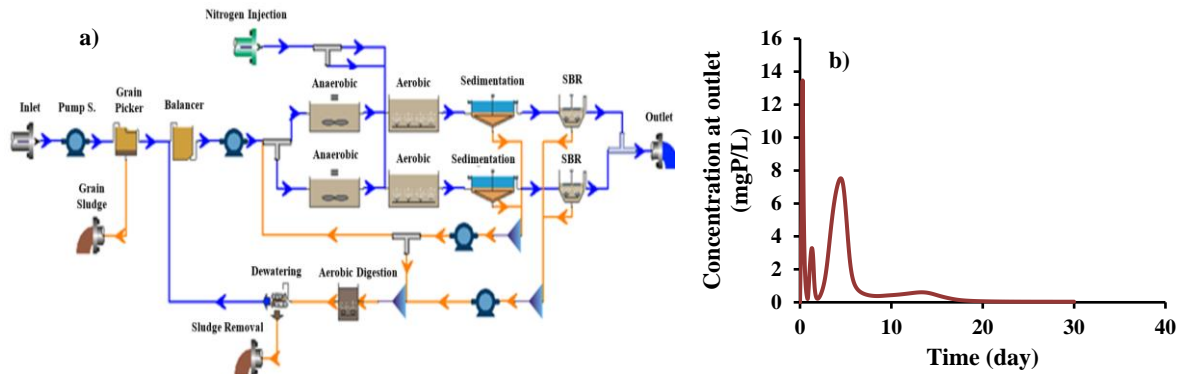


Fig. 1. Results of dynamic simulation of scenario 8 in the first module based on the EBPR method, a) Placement schematic, b) Phosphate removal changes

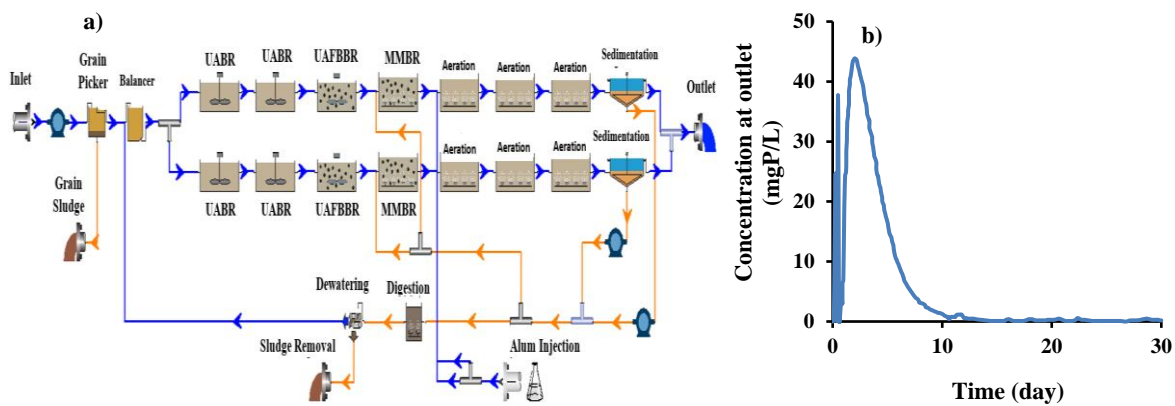


Fig. 2. Results of dynamic simulation of scenario 13 in the second module based on the EBPR method, a) Placement schematic, b) Phosphate removal changes

4. Conclusions

The increasing need for water, affected by population growth, agricultural and industrial development, has made it necessary to pay more attention to the protection and prevention of contamination of water sources and the recycling and repeated use of wastewater. In the present study, Biowin software was successfully used to model an industrial treatment unit, and the options to improve the performance of the treatment process in different conditions were simulated and analyzed. In all stages, the actual

data of the incoming wastewater and the operating conditions of the treatment plant were used, and a total of 13 different operating scenarios were designed and analyzed. According to the obtained results, sludge return rate, nitrogen injection rate, and aerobic and anaerobic conditions are the key variables affecting the treatment efficiency, and by properly adjusting it according to the flow rate and composition of the incoming wastewater, it will be possible to achieve high treatment efficiency with minimum cost.

آب و فاضلاب، دوره ۳۵، شماره ۲، صفحه: ۷۱-۵۳

بهینه‌سازی حذف فسفات از فاضلاب صنعتی در رآکتور ناپیوسته متوالی و واحد هوادهی گسترده

محمدرضا فدائی تهرانی^{۱*}، پوریا جمشیدی پور^۲

۱- استادیار و عضو هیئت علمی مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی اصفهان، پژوهشگاه نیرو، اصفهان، ایران (نویسنده مسئول) mfadaei@nri.ac.ir
 ۲- کارشناس ارشد و پژوهشگر، تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک صنعتی مورچه‌خورت، اصفهان، ایران

(دریافت ۱۴۰۲/۱۲/۱۳ پذیرش ۱۴۰۳/۳/۱)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

فدائی تهرانی، م. ر.، جمشیدی پور، پ.، ۱۴۰۳، بهینه‌سازی حذف فسفات از فاضلاب صنعتی در رآکتور ناپیوسته متوالی و واحد هوادهی گسترده.

<https://doi.org/10.22093/wwj.2024.446732.3405> .۷۱-۵۳، (۲)۳۵، آب و فاضلاب،

چکیده

امروزه به دلیل نیاز فزاینده به آب، حفاظت از منابع آبی در مقابل آلودگی‌ها به ویژه جلوگیری از نشست فاضلاب و استفاده مجدد پساب، یکی از اولویت‌های اصلی جوامع بوده و سرمایه‌گذاری گسترده برای تصفیه فاضلاب، امری اجتناب‌ناپذیر شده است. برای دستیابی به کارایی مناسب تصفیه با حداقل هزینه، پایش پیوسته فرایندهای بهره‌برداري متناسب با تغییرات کمی و کیفی فاضلاب ورودی مورد نیاز است؛ به همین دلیل، توسعه ابزارهای لازم و شبیه‌سازی عملکرد سیستم‌های تصفیه فاضلاب، اهمیت بیشتری یافته است. در این پژوهش، شبیه‌سازی عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی در نرم‌افزار BioWIN برای حذف بیولوژیکی و شیمیایی فسفر، و تغییر برنامه عملکردی سیستم رآکتور ناپیوسته متوالی برای دستیابی به بهترین کارایی، انجام شد و شرایط مختلف بهره‌برداري با تلفیق بازگشت لجن به واحد بی‌هوازی، تبدیل واحدهای بی‌هوازی سری دوم به هوازی و تزریق مقدار مختلف نیتروژن به واحد هوازی در دو سیستم SBR و MBBR، تحلیل شد. بنابر نتایج به دست آمده در سیستم SBR، بهترین شرایط کارکرد با تلفیق بازگشت لجن به میزان $1/27 \text{ m}^3/\text{day}$ از مخزن ته‌نشینی به واحد بی‌هوازی، تبدیل واحدهای بی‌هوازی سری دوم به واحد هوازی و تزریق محلول نیتروژن 10 g/L با دبی $1 \text{ m}^3/\text{day}$ به دست آمد؛ به طوری که بعد از گذشت ۲ هفته میزان فسفات در خروجی تصفیه‌خانه به صفر کاهش یافت. در سیستم MBBR، هر یک از راه‌حل‌های تزریق منبع نیتروژن، هوادهی کافی و تزریق آلوم، می‌تواند غلظت فسفات در پساب خروجی را به صفر کاهش دهد. نرخ تزریق نیتروژن و درصد بازگشت لجن در سیستم SBR و انتخاب دوز مناسب تزریق آلوم و میزان هوادهی در سیستم MBBR متغیرهای کلیدی تصفیه فاضلاب هستند؛ برای دستیابی به شرایط بهینه حذف فسفر، حد مطلوب هر یک از این متغیرهای اصلی با شبیه‌سازی و در نظرگیری عوامل فنی، اجرایی و اقتصادی، انتخاب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تصفیه، فاضلاب صنعتی، رآکتور ناپیوسته متوالی، رآکتور بستر متحرک، BioWIN، فسفر



۱- مقدمه

تصفیه فاضلاب و کاهش آلاینده‌های آن به کمتر از حدود مجاز، از پیش‌نیازهای اصلی توسعه پایدار جوامع محسوب می‌شود (Obaideen et al., 2022). به علاوه، افزایش روزافزون تقاضای آب به دلیل رشد جمعیت و صنعت، توسعه تأسیسات جمع‌آوری، تصفیه و بازچرخانی پساب در کشورهای خشک مانند ایران را در اولویت قرار داده است (Tehrani et al., 2014). هرچند، روش‌های متنوعی در تصفیه فاضلاب استفاده می‌شود، ولی به دلایلی مانند ضعف در طراحی و ساخت، دانش ناکافی بهره‌برداری، استفاده از تجهیزات یا مواد نامناسب و عدم صرف هزینه‌های لازم، در بسیاری از موارد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کارایی مطلوب را نداشته و تخلیه پساب خروجی از آنها به منابع آب، مشکلاتی را به وجود آورده است (Silva, 2023). حضور بیش از اندازه مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر می‌تواند مشکلاتی نظیر رشد بیش از حد جلبک‌ها و ایجاد شرایط بی‌هوازی در محیط آبی در منابع پذیرنده را ایجاد کند (Rozić, 2022).

هدف اولیه تصفیه فاضلاب، حذف آلاینده‌های آلی است؛ اما به دلیل اثرات سوء برخی مواد مغذی موجود در پساب از قبیل نیتروژن و فسفر و در نتیجه، سخت‌گیرانه‌تر شدن قوانین و استانداردهای محیط‌زیستی تخلیه پساب‌ها در سال‌های اخیر، توسعه روش‌های پیشرفته برای تصفیه پساب مورد توجه قرار گرفته است (Yongzhen et al., 2008). به طوری که در راستای رسیدن به اهداف توسعه هزاره سوم^۱، سیستم‌های بهداشتی در دنیا شامل تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، به صورت میانگین رشد ۵۴ تا ۶۸ درصدی را تجربه کرده‌اند (Obaideen et al., 2022). توسعه سریع این سیستم‌ها، منجر به ایجاد مسائل مدیریتی و بهره‌برداری متعددی شده است که تصفیه‌خانه‌های محلی و کوچکتر، شرایط دشوارتری را تجربه می‌کنند (Midkiff, 2016).

بنابر پژوهش‌های اخیر، برای دستیابی به کارایی مطلوب، فرایندهای تصفیه باید متناسب با حجم فاضلاب تولیدی، مشخصه‌های فاضلاب، دانش فنی و امکانات موجود و وضعیت اقتصادی، کنترل و به طور پیوسته بهینه‌سازی شوند. هر چند به دلیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا، امکان جایگزینی تأسیسات تصفیه

وجود ندارد، اما با ارزیابی وضعیت موجود و بهینه‌سازی روش بهره‌برداری می‌توان با حداقل هزینه، به بهترین شرایط بهره‌برداری از امکانات موجود دست یافت (Alvarado, 2013, Vineyard et al., 2024).

روند مدل‌سازی واحدهای تصفیه و شبیه‌سازی فرایندی در دو دهه اخیر شتاب گرفته است و ابزارهای نرم‌افزاری متعددی برای این منظور ارائه و پژوهش‌های مختلفی در زمینه بهینه‌سازی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به کمک این ابزارها انجام شده است. به طور نمونه، باقری پردستی و ترابیان بهینه‌سازی تصفیه‌خانه شوک آلی و امکان‌سنجی افزایش ظرفیت تصفیه‌خانه با استفاده از فرایند MBBR^۲ به کمک نرم‌افزارهای WEST و STOAT بررسی کردند. بنابر نتایج آنها، تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب تهران با توجه به ویژگی‌های ابعادی واحدها، تا حداکثر ۴۵ درصد، ظرفیت افزایش ورود فاضلاب را دارد و چنانچه فاضلاب ورودی تا حداکثر ۴۵ درصد افزایش COD نسبت به مقدار میانگین ورودی را داشته باشد، پساب خروجی برای آبیاری فضای سبز مناسب خواهد بود. آنها نشان دادند، این تصفیه‌خانه همچنین امکان افزایش ظرفیت فاضلاب ورودی به میزان ۲ برابر حد میانگین را به کمک تغییر فرایندی به روش MBBR خواهد داشت (Bagheri, 2017).

(Pardesti and Torabian, 2017)

همچنین آهنگری و همکاران، بهینه‌سازی پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی شکوهیه قم را با به کارگیری منعقدکننده‌های پلی‌آلومینیوم کلراید، کلرورفریک و PAC^۳ قبل از ورود به واحد اسمز معکوس بررسی کردند. گزارش آنها به این صورت بود که بیشترین میزان حذف کدورت با آلوم برابر با ۹۵ درصد و کمترین مقدار حذف کدورت با کلرورفریک برابر ۵۰ درصد رخ داد. کمترین کارایی حذف BOD₅ با آلوم برابر ۸۸ درصد در pH برابر ۴ و بالاترین میزان حذف BOD₅ در منعقدکننده کلرورفریک برابر ۹۶ درصد در pH برابر ۴ گزارش شد (Ahangari et al., 2020).

در پژوهشی، میزان انطباق مقررات محیط‌زیستی انواع مختلف سیستم‌های تصفیه فاضلاب بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان

² Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)

³ Poly Aluminum Chloride (PAC)

¹ Millennium Development Goals (MDG)



شبهه‌سازی فرایندهای مختلف تصفیه فاضلاب در پژوهش‌های متعدد دیگری نیز گزارش شده است. (Kılıç and Çeçen, 2023, Vitanza et al., 2015)

بررسی پژوهش‌ها در حوزه تصفیه فاضلاب نشان می‌دهد، ارزیابی عملکرد واحدهای تصفیه و بهینه‌سازی فرایندهای مختلف تصفیه برای بهبود عملکرد و دستیابی به کارایی مطلوب حذف آلاینده‌ها، به صورت آزمایشگاهی و مدل‌های نرم‌افزاری، یکی از موضوعات جذاب و به روز در جوامع علمی بوده که نتایج آن تأثیر مستقیم بر کیفیت بهره‌برداری از تأسیسات تصفیه فاضلاب و کاهش هزینه‌ها دارد. در این پژوهش، شبهه‌سازی عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب، برای دو سیستم تصفیه راکتور ناپیوسته متوالی^۱ و MBBR با کاربرد هم‌زمان انجام شد. همچنین، برای انطباق حداکثری نتایج با واقعیت، از داده‌های بهره‌برداری تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی مورچه‌خورت برای مدل‌سازی و تحلیل‌ها در محیط نرم‌افزاری BioWIN استفاده شد. نوآوری این پژوهش، بهینه‌سازی عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب در حذف فسفات با ارائه طرح اصلاحی برای واحدهای SBR و MBBR بوده و نتایج آن، می‌تواند برای رفع مشکل فسفات پساب خروجی در شرایط مختلف بهره‌برداری با حداقل هزینه و حداکثر سهولت استفاده شود.

۲- مواد و روش‌ها

برای این پژوهش، از مشخصات و داده‌های بهره‌برداری تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت اصفهان استفاده شد. این واحد تصفیه، از دو سیستم مجزای SBR و MBBR برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی کارخانه‌جات واقع در شمال اصفهان، استفاده می‌کند. در مدل‌های پایه از ابعاد واحدها، میزان جریان روزانه و غلظت‌های آلاینده‌های منتخب به‌عنوان ورودی استفاده شد. پارامترهای COD، BOD₅، TSS، NO₃ و PO₄ از داده‌های اندازه‌گیری شده در طول ایام بهره‌برداری و سایر پارامترهای مورد نیاز برای شبهه‌سازی در نرم‌افزار از پژوهش‌ها و مراجع معتبر و تجربیات نویسندگان پژوهش انتخاب شد (Vineyard et al., 2024, Kılıç and Çeçen, 2023)

BioWIN نرم‌افزار جامع شبهه‌سازی برای طراحی، تحلیل و

داد برای اصلاح و بهبود کارایی تصفیه هوازی فاضلاب برای کاهش بار نیتروژن به طراحی سناریوهای متناسب با دبی و مشخصات فاضلاب نیاز است. در این پژوهش، شبهه‌سازی فرایند بیولوژیکی حذف نیتروژن در واحد تصفیه با مدیریت مؤثر هوادهی انجام شد و دو پیشنهاد مجزا شامل هوادهی در غلظت اکسیژن محلول کم یا حالت هوادهی متناوب ارائه شده است (Ajavi and Ogunbayo, 2012).

در پژوهشی، عملکرد و سناریوهای کنترل فرایند برای حذف بیولوژیکی مواد مغذی در تصفیه‌خانه‌ای در فلوریدا با سیستم اکسیداسیون هوادهی گسترده بررسی شد. از انجام سه فرایند کنترلی هوادهی، میزان لجن بازگشتی و افزودن مواد شیمیایی نتیجه‌گیری شد که افزودن سلکتورهای بی‌هوازی قبل از مخزن اکسیداسیون به کنترل رشد میکروارگانیسم‌های فیلامنتوس و آغاز حذف بیولوژیکی فسفر کمک می‌کند. به علاوه، افزودن آلومینیوم سولفات در حذف شیمیایی فسفر تأثیر زیادی دارد. همچنین، با کنترل نرخ لجن فعال برگشتی می‌توان شرایط لازم برای حذف تأثیر نامطلوب نوسانات سن لجن و مشخصه‌های فاضلاب ورودی را فراهم آورد (Knapp, 2014).

در پژوهش دیگری، طراحی یک سیستم نظارتی-عملیاتی و کنترلی برای تصفیه‌خانه فاضلاب پیشرفته هیلزبورو در فلوریدا با استفاده از نرم‌افزار BioWIN انجام شد. در نتیجه این پژوهش، سناریوهای مختلف بهره‌برداری بر مبنای متغیرهای کلیدی مانند هوادهی در مخزن اکسیداسیون، نرخ بازچرخانی و نرخ دورریز لجن پیشنهاد شد (Rathore, 2018).

در پژوهشی دیگر، به ارزیابی سناریوهای مدیریت مؤثر نیتروژن و فسفر در فرایندهای تصفیه فاضلاب پرداخته شد. در این پژوهش مواردی مانند سرنوشت نیتروژن و فسفر در سیستم‌های مختلف تصفیه بیولوژیکی، هاضم هوازی و جریان برگشتی، تعیین سرنوشت فسفر در یک سیستم MBBR با قابلیت وقوع فرایندهای نیتروفیکاسیون و دنیتروفیکاسیون هم‌زمان و ارزیابی پتانسیل به‌کارگیری فرایند حذف افزایش یافته بیولوژیکی فسفر در فرایند MLE با اضافه کردن لجن فعال برگشتی با استفاده از پایلوت آزمایشگاهی و مدل BioWIN بررسی شد. نتایج این پژوهش توانایی مدل BioWIN در شبهه‌سازی سناریوهای مختلف حذف نیتروژن و فسفر را نشان داد. کارایی و قابلیت مدل BioWIN در

¹ Sequence Batch Reactor (SBR)



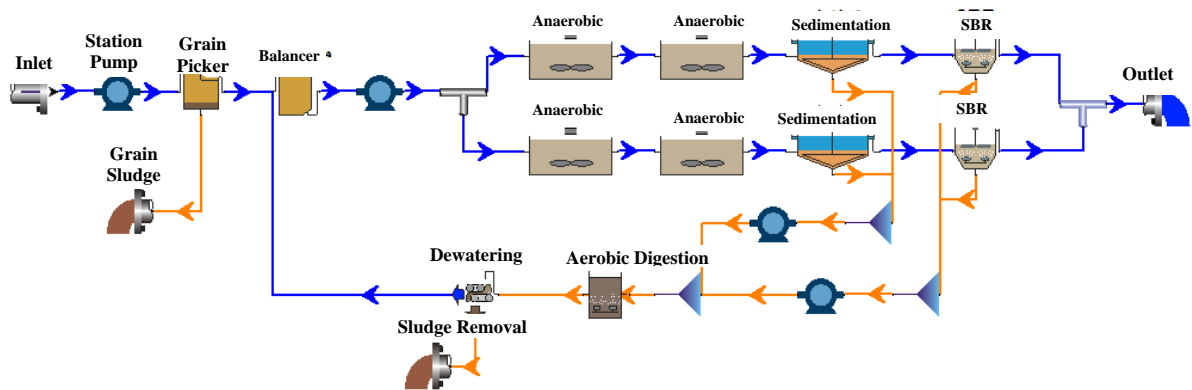


Fig. 1. Schematic of the first module (SBR) of Morchekhort industrial town treatment plant in BioWIN software (blue line: wastewater - orange line: sludge)

شکل ۱- شماتیک مدول اول، SBR، تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت در نرم‌افزار BioWIN (خط آبی: پساب - خط نارنجی: لجن)

خطا در اطلاعات ورودی به مدول شبیه‌سازی شده، ابتدا آنالیز حالت پایدار انجام شد. در پژوهش‌های قبلی، انجام این مرحله قبل از آنالیز حالت دینامیکی برای رسیدن به حالت پایداری از سیستم تصفیه توصیه شده است (Vineyard et al., 2024, Kiliç and Çeçen, 2023).

در نهایت، تحلیل عملکرد سیستم SBR در حالت دینامیکی با دوره شبیه‌سازی ۳۰ روزه انجام و مشخصات پساب و لجن خروجی از این مدول، از المان‌های پساب خروجی و لجن خروجی برداشت شد. مشخصات میانگین سالانه فاضلاب ورودی و پساب خروجی سیستم SBR متوالی مطابق جدول ۱ است. مقایسه مقدار پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و گزارش شده توسط نرم‌افزار BioWIN در پساب خروجی نشان داد، نرم‌افزار توانسته تا حد قابل قبولی رفتار مدول اول را به درستی شبیه‌سازی کند. با توجه به این نتایج در مراحل بعدی، از مدول شبیه‌سازی شده برای اجرای سناریوهای مختلف به‌منظور بهبود حذف فسفات استفاده شد.

مدول دوم: شبیه‌سازی عملکرد سیستم MBBR

در شکل ۲ شماتیک سیستم MBBR تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت اصفهان در محیط نرم‌افزار BioWIN نشان داده شده است. مشابه توضیحات مدول اول، مشخصات فاضلاب ورودی به سیستم MBBR و کنترل داده‌ها و نبود خطا در اطلاعات ورودی و در نهایت، آنالیز عملکرد سیستم MBBR در حالت دینامیکی با دوره شبیه‌سازی ۳۰ روزه انجام شد. مشخصات میانگین سالانه

ارزیابی عملکرد سیستم‌های مختلف تصفیه فاضلاب است و ابزار قدرتمندی را در اختیار طراحان و بهره‌برداران فرایند قرار می‌دهد. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان رفتار انواع سیستم‌های تصفیه را در شرایط متنوع ورود فاضلاب‌های مختلف، تجزیه و تحلیل کرد. این نرم‌افزار می‌تواند فرایندهای لجن فعال، هضم بی‌هوازی، رسوب شیمیایی فسفر، نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون را ادغام و تحلیل کند (Kiliç and Çeçen, 2023). در این پژوهش، پس از ساخت مدل، نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج واحد بهره‌برداری و آزمایشگاهی تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت اصفهان مقایسه و صحت عملکرد مدل، واسنجی شد. برای دسترسی به اهداف این پژوهش، از دو مدول برای شبیه‌سازی عملکرد فرایندی تصفیه‌خانه استفاده شد:

مدول اول: شبیه‌سازی عملکرد سیستم SBR

در شکل ۱ شماتیک طراحی شده مدول اول (سیستم SBR) در محیط نرم‌افزار BioWIN نشان داده شده است. پس از قرار دادن واحدهای مختلف تصفیه‌خانه، پمپ‌ها، تجمیع‌کننده‌ها و تقسیم‌کننده‌های جریان، اتصال آنها با استفاده از خطوط آبی معرف مسیرهای حرکت فاضلاب و خط نارنجی معرف مسیرهای حرکت لجن انجام شد. کنترل مشخصات فاضلاب ورودی به سیستم SBR، در واحد اول شکل ۱، پس از تنظیم ابعاد واحدها، جریان‌های برگشتی و لجن دفعی، آنالیز تعادل جریان برای برابری جریان‌های ورودی و خروجی انجام شد. سپس، با کنترل کردن داده‌ها و نبود



جدول ۱- مشخصات فاضلاب ورودی و پساب خروجی مدول اول (SBR) - میانگین سالانه
Table 1. Characteristics of incoming and outgoing sewage of the first module (SBR) - annual average

Characteristics of sewage	Unit	Input value	Output value	
			Actual	BioWIN
Flow rate	m ³ /d	800	-	-
Temperature	°C	23.8	23.3	23.8
COD	mg COD/L	2917	1610	1660
BOD ₅	mg BOD/L	1863	995	1014
TSS	mg TSS/L	587	670	661
N	mg N/L	71.7	65	61.4
P	mg P/L	70.8	670	651.5
Sulfate	mg S/L	15	8.5	7.9
pH	-	8.11	7.3	7.3
Alkalinity	mmol/L	6	27	25

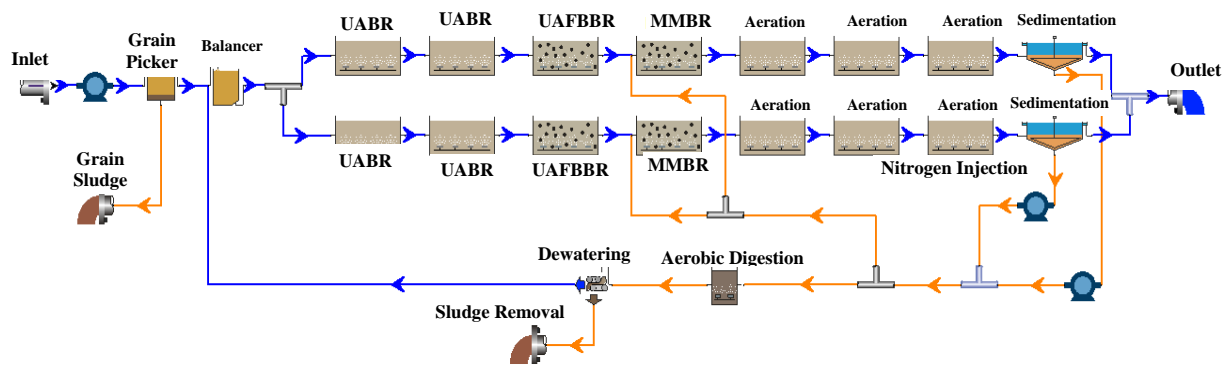


Fig. 2. Schematic of the second module, MBBR, of Morchekhort industrial town treatment plant in BioWIN software (blue line: wastewater - orange line: sludge)

شکل ۲- شماتیک مدول دوم، MBBR، تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت در نرم‌افزار BioWIN (خط آبی: پساب - خط نارنجی: لجن)

حالت بهره‌برداری سیستم‌های فعلی و تأثیر آنها در بهبود حذف فسفات با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی بررسی شد. سناریوی پایه شامل تغییرات حذف فسفر در شرایط موجود بهره‌برداری بر اساس شبیه‌سازی دینامیکی ۳۰ روزه بود. سناریوی پایه برای هر دو مدول اول و دوم اجرا شد که نتایج آن در شکل ۳ آمده است.

همان‌طور که در دو نمودار شکل ۳ مشاهده می‌شود، حذف فسفات در شرایط فعلی بهره‌برداری در مدول اول به ۴۷/۷۱ mg/L و در مدول دوم به ۴۱ mg/L رسید. از آنجا که مقدار استاندارد فسفات در پساب خروجی بر اساس استاندارد تخلیه پساب ایران

فاضلاب ورودی و پساب خروجی سیستم MBBR در جدول ۲ آمده است. مقایسه مقدار پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و گزارش شده توسط نرم‌افزار BioWIN در پساب خروجی نشان داد، نرم‌افزار توانسته تا حد قابل‌قبولی رفتار مدول دوم را به درستی شبیه‌سازی کند.

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش، سناریوهای مختلف استفاده از روش حذف بیولوژیکی فسفر افزایش یافته^۱، ترسیب شیمیایی فسفر^۲ و تغییر

² Chemical Precipitation of Phosphorus Removal (CPPR)

¹ Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR)



جدول ۲- مشخصات فاضلاب ورودی و پساب خروجی مدول دوم (MBBR)- میانگین سالانه
Table 2. Characteristics of incoming and outgoing sewage of the second module
 (MBBR) - annual average

Characteristics of sewage	Unit	Input value	Output value	
			Actual	BioWIN
Flow rate	m ³ /d	1200	-	1185.9
Temperature	°C	23.8	23.3	20
COD	mg COD/L	2917	70.4	89.81
BOD ₅	mg BOD/L	1863	24.4	26.07
TSS	mg TSS/L	587	26.7	23.49
N	mg N/L	71.7	5.5	4.21
P	mg P/L	70.8	38.1	41.54
Sulfate	mg S/L	15	14.5	12.62
pH	-	8.11	8.2	7.61
Alkalinity	mmol/L	6	23	21.37

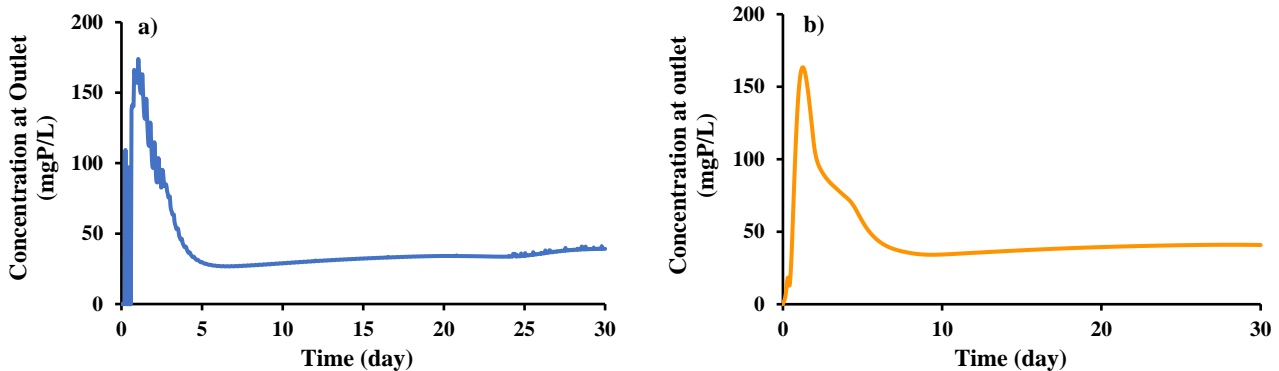


Fig. 3. Results of the base scenario simulation in the current state of operation, a) module 1, b) module 2
 شکل ۳- نتایج شبیه‌سازی سناریوی پایه در وضعیت فعلی بهره‌برداری، a) مدول اول، b) مدول دوم

۳-۱- سناریوهای بهینه‌سازی حذف فسفات در مدول اول بر مبنای روش EBPR

به منظور شبیه‌سازی حذف فسفات در مدول اول بر مبنای روش EBPR، هشت سناریو تعریف شده که در شکل ۴ شماتیک آنها نشان داده شده است.

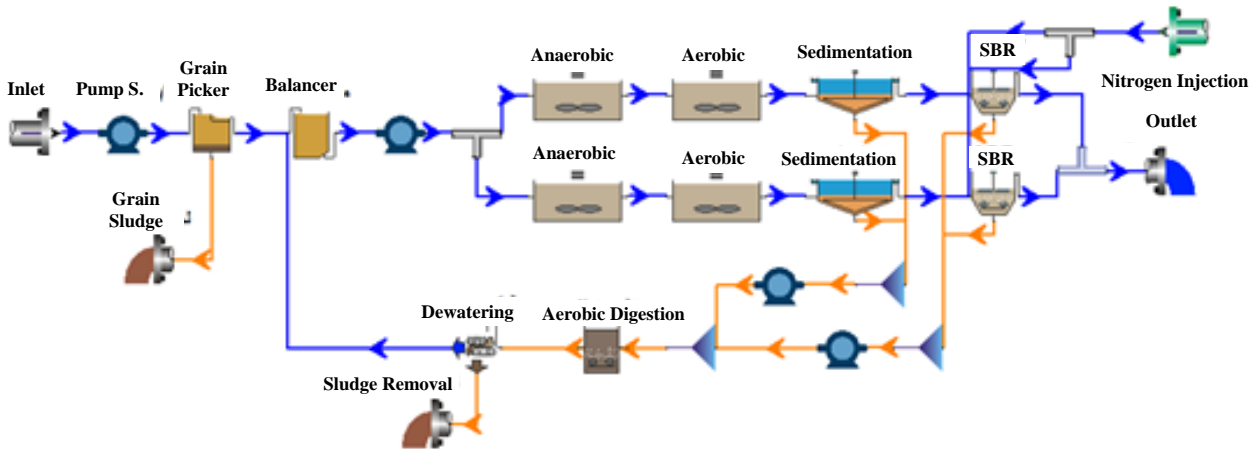
- سناریوی ۱

در این سناریو، با توجه به آلام‌های خروجی شبیه‌سازی سناریوی پایه که محدودیت نیتروژن در واحد SBR را نشان داده بود، نیتروژن آلی محلول تجزیه‌پذیر با غلظت‌ها و دی‌های مختلف به مخازن SBR تزریق شد. بهینه‌ترین مقدار برای حذف آلام گفته شده غلظت ۱۰۰۰۰ mg/L با دبی ۱ m³/day به هریک از مخازن SBR بود که نتایج حاصل از آن در شکل ۵ ارائه شده است. همان

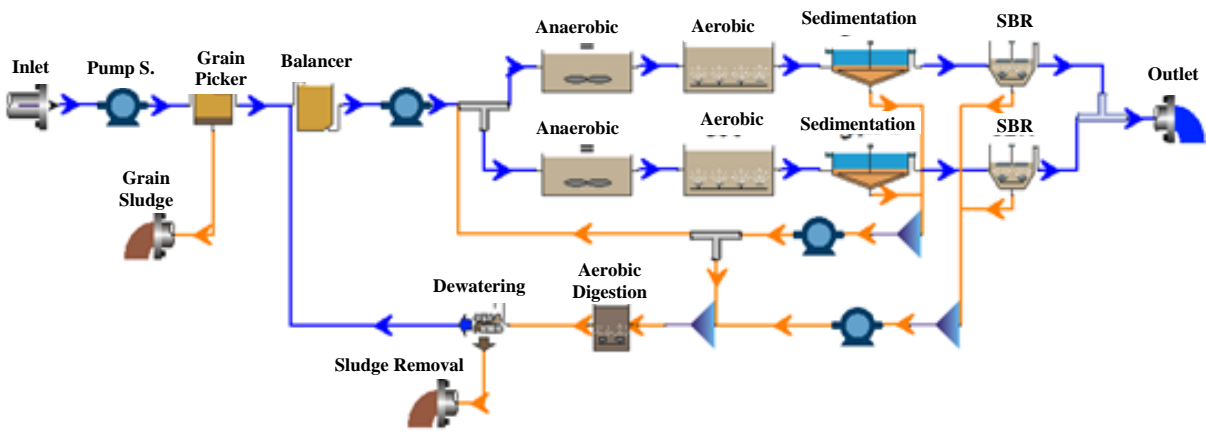
۶ mg/L تعیین شده، بنابراین استفاده از روش‌های مختلف بهبود حذف فسفات شامل روش‌های بیولوژیکی و شیمیایی موردنیاز است. بنابراین در این پژوهش، سناریوهای مناسب برای بهبود حذف فسفات در مدول اول با توجه به وضعیت بهره‌برداری فعلی آن، یعنی عدم بازگشت لجن به ابتدای واحد بی‌هوازی و عدم وجود هوادهی پس از واحد بی‌هوازی، بر مبنای فرایند EBPR، طراحی شد. همچنین، در نرم‌افزار شبیه‌سازی BioWIN مدل‌های مختلف CPPR با استفاده از یون‌های چندظرفیتی آهن و آلومینیوم تعریف شد.

با استفاده از این مدل‌ها می‌توان در صورت اضافه کردن ترکیبات حاوی این یون‌ها در نقاط مختلف سیستم تصفیه، بازده فرایند CPPR را محاسبه و بهینه‌سازی افزایش بازده حذف فسفر را انجام داد. سناریوهای مختلف CPPR در مدول دوم نیز تحلیل شد.

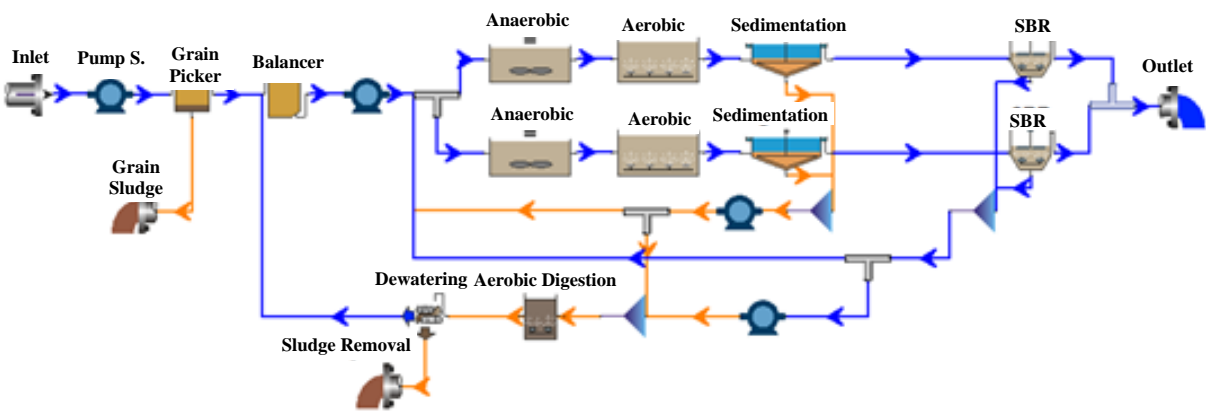




Scenario 1



Scenario 2, 3, 4



Scenario 5



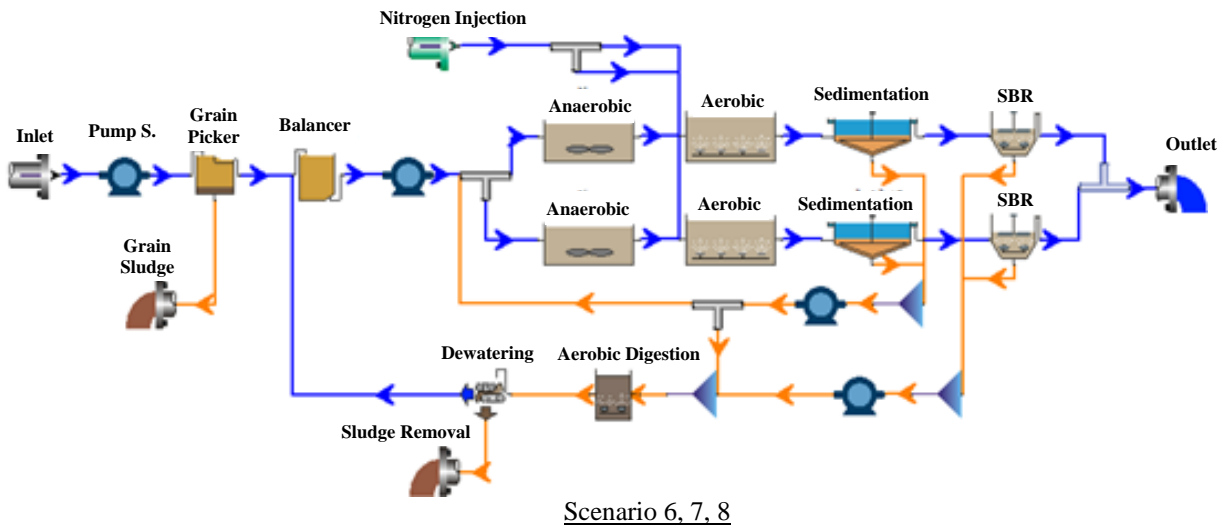


Fig. 4. Placement schematic of treatment units in different scenarios of phosphate removal optimization in the first module based on the EBPR method

شکل ۴- شماتیک جانمایی واحدهای تصفیه در سناریوهای مختلف بهینه‌سازی حذف فسفات در مدول اول بر مبنای روش EBPR

سناریوی ۳-

در این سناریو، به منظور استفاده از فرایند EBPR، ابتدا میزان لجن دفعی از حوض ته‌نشینی به ۱۰ برابر افزایش یافته و سپس ۹۰ درصد جریان لجن دفع شده ($12/7 \text{ m}^3/\text{day}$)، به ابتدای واحد بی‌هوای اول بازگردانده شد. همچنین، واحد بی‌هوای دوم به واحد هوادهی تبدیل شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی سناریوی ۳ غلظت فسفات در پساب خروجی را نسبت به سناریوی پایه به $44/21 \text{ mg/L}$ کاهش داده است. با این وجود اگرچه افزایش حجم لجن دفعی روزانه، بازگشت لجن از مخزن ته‌نشینی و تبدیل مخزن بی‌هوای دوم به واحد هوایی، غلظت فسفات خروجی را در حدود ۳ واحد کاهش داده، اما به تنهایی نمی‌تواند راه‌حل مناسبی در رساندن غلظت فسفات خروجی به محدوده استاندارد تخلیه مجاز باشد. همچنین، مشابه با سناریوی ۲، اختلال کمبود نیتروژن هم در مخازن SBR و هم در واحد هوایی در این سناریو گزارش شد.

سناریوی ۴-

در سناریوی ۴، به منظور استفاده از فرایند EBPR، این تغییرات در نحوه بهره‌برداری از مدول اول اعمال شد؛ ابتدا میزان لجن دفعی از حوض ته‌نشینی به ۱۰۰ برابر افزایش یافت، سپس ۹۰ درصد جریان لجن دفع شده ($127/7 \text{ m}^3/\text{day}$)، به ابتدای واحد بی‌هوایی

طور که مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی سناریوی ۱ غلظت فسفات در پساب خروجی را به $41/19 \text{ mg/L}$ کاهش داده است. با این وجود افزودن نیتروژن به مخازن SBR اگرچه شرایط کمبود نیتروژن در این واحد را تا حدی بهبود داده (کاهش غلظت فسفات خروجی به میزان ۶ واحد)، اما نمی‌تواند راه‌حل مناسبی در رساندن غلظت فسفات خروجی به حد استاندارد مجاز تخلیه باشد.

سناریوی ۲-

در این سناریو، به منظور استفاده از فرایند EBPR، لجن حوض ته‌نشینی به میزان ۹۰ درصد جریان لجن دفع شده (m^3/day)، به ابتدای واحد بی‌هوایی اول برگشت و واحد بی‌هوایی دوم به هوایی تبدیل شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی سناریوی ۲ غلظت فسفات در پساب خروجی را به $40/44 \text{ mg/L}$ کاهش داده است. با این وجود اگرچه بازگشت لجن از مخزن ته‌نشینی و تبدیل مخزن بی‌هوایی دوم به واحد هوایی، غلظت فسفات خروجی را در حدود ۷ واحد کاهش داده است، اما به تنهایی نمی‌تواند راه‌حل مناسبی در رساندن غلظت فسفات خروجی به محدوده استاندارد مجاز تخلیه باشد. همچنین، اختلال کمبود نیتروژن هم در مخازن SBR و هم در واحد هوایی در این سناریو گزارش شد.



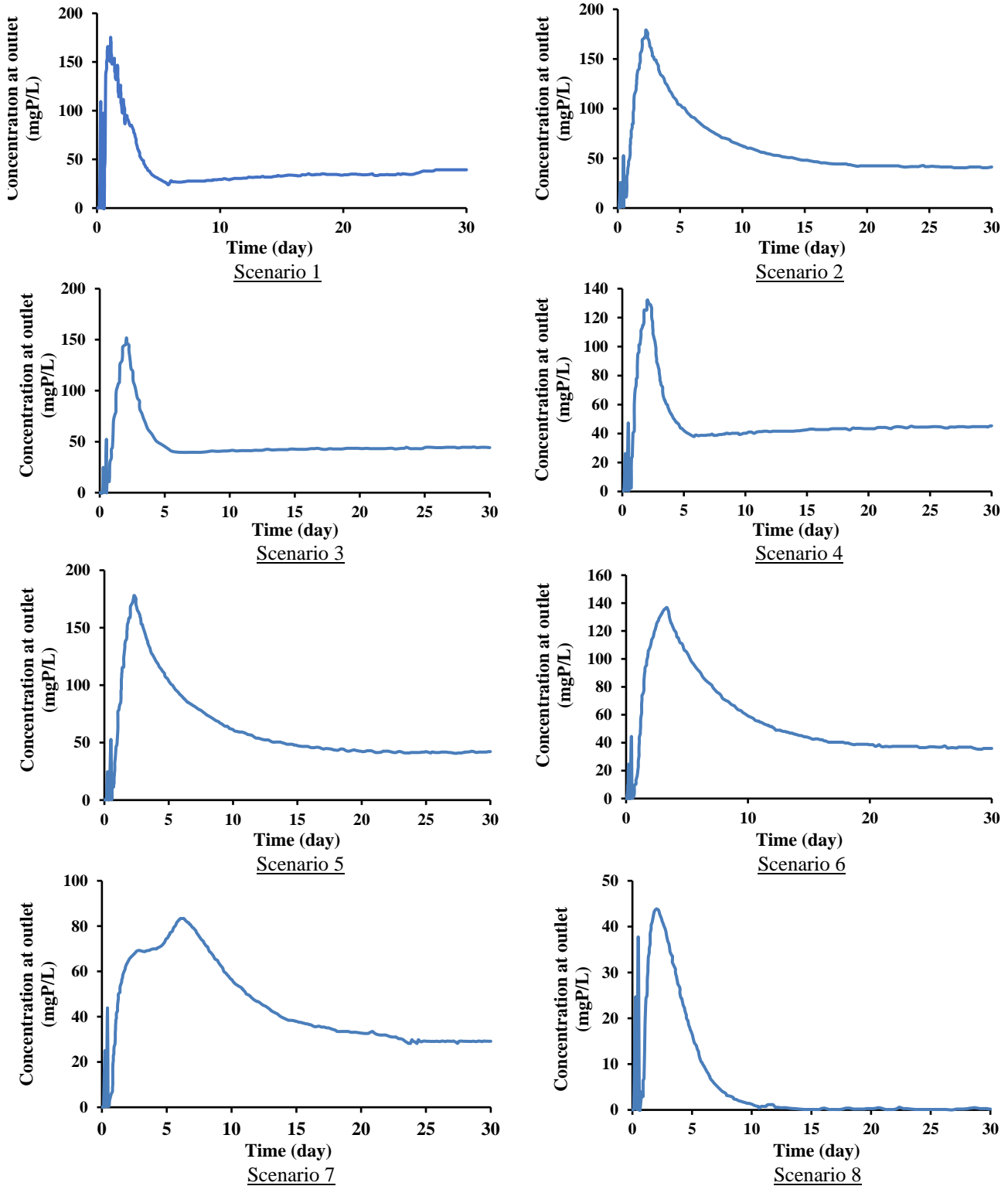


Fig. 5. Results of phosphate removal changes in the 30-day dynamic simulation of different phosphate removal optimization scenarios in the first module based on the EBPR method

شکل ۵- نتایج تغییرات حذف فسفات در شبیه‌سازی دینامیکی ۳۰ روزه سناریوهای مختلف بهینه‌سازی حذف فسفات در

مدول اول بر مبنای روش EBPR



ته‌نشینی کفایت می‌کند. در سناریوی ۶، پس از تبدیل واحد بی‌هوازی دوم به واحد هواهی، نیتروژن آلی محلول تجزیه‌پذیر با دبی $1 \text{ m}^3/\text{day}$ و غلظت 5000 mg/L به هر یک از مخازن هواهی تزریق شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی سناریوی ۶ غلظت فسفات در پساب خروجی را نسبت به سناریوی پایه به $36/10 \text{ mg/L}$ کاهش داده است. با این وجود اگرچه بازگشت لجن از مخزن ته‌نشینی، تبدیل مخزن بی‌هوازی دوم به واحد هوازی و تزریق منبع نیتروژن با غلظت 5000 mg/L ، غلظت فسفات خروجی را نسبت به سناریوی پایه در حدود ۱۱ واحد کاهش داده، اما به تنهایی نمی‌تواند راه‌حل مناسبی در رساندن غلظت فسفات خروجی به محدوده استاندارد تخلیه مجاز باشد. همچنین، اختار کمبود نیتروژن هم در مخازن SBR و هم در واحد هوازی در این سناریو گزارش شد.

- سناریوی ۷

بنابر نتایج سناریوی قبلی، افزایش غلظت نیتروژن آلی محلول تجزیه‌پذیر مورد نیاز است. بنابراین، در سناریوی ۷، محلول حاوی نیتروژن با دبی $1 \text{ m}^3/\text{day}$ و غلظت 8000 mg/L به هر یک از مخازن هواهی تزریق شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی سناریوی ۷ غلظت فسفات در پساب خروجی را نسبت به سناریوی پایه به $27/7 \text{ mg/L}$ کاهش داده است. با این وجود اگرچه بازگشت لجن از مخزن ته‌نشینی، تبدیل مخزن بی‌هوازی دوم به واحد هوازی و تزریق منبع نیتروژن با غلظت 8000 mg/L غلظت فسفات خروجی را نسبت به سناریوی پایه در حدود ۲۰ واحد کاهش داده، اما به تنهایی نمی‌تواند راه‌حل مناسبی در رساندن غلظت فسفات خروجی به محدوده استاندارد تخلیه مجاز باشد. همچنین، اختار کمبود نیتروژن هم در مخازن SBR و هم در واحد هوازی در این سناریو گزارش شد.

- سناریوی ۸

بنابر نتایج دو سناریوی قبلی، نیاز به افزایش غلظت نیتروژن آلی محلول تجزیه‌پذیر اثبات شد. بنابراین، در سناریوی ۸، محلول حاوی نیتروژن با دبی $1 \text{ m}^3/\text{day}$ و غلظت 10000 mg/L به هر یک از مخازن هواهی تزریق شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی سناریوی ۸ غلظت فسفات در پساب خروجی

اول بازگردانده شد. همچنین، واحد بی‌هوازی دوم به واحد هواهی تبدیل شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی سناریوی ۴ غلظت فسفات در پساب خروجی را نسبت به سناریوی پایه به $44/48 \text{ mg/L}$ کاهش داده است. با این وجود اگرچه افزایش حجم لجن دفعی روزانه، بازگشت لجن از مخزن ته‌نشینی و تبدیل مخزن بی‌هوازی دوم به واحد هوازی، غلظت فسفات خروجی را در حدود ۳ واحد کاهش داده، اما به تنهایی نمی‌تواند راه‌حل مناسبی در رساندن غلظت فسفات خروجی به محدوده استاندارد تخلیه مجاز باشد. همچنین، مشابه با سناریوهای ۲ و ۳، اختار کمبود نیتروژن هم در مخازن SBR و هم در واحد هوازی در این سناریو گزارش شد.

- سناریوی ۵

در سناریوی ۵، به منظور استفاده از فرایند EBPR، لجن حوض ته‌نشینی و لجن تخلیه شده از واحد SBR به میزان ۹۰ درصد جریان لجن دفع شده (به ترتیب $1/27 \text{ m}^3/\text{day}$ و ۴۶)، به ابتدای واحد بی‌هوازی اول بازگردانده و واحد بی‌هوازی دوم به واحد هواهی تبدیل شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی سناریوی ۵ غلظت فسفات در پساب خروجی را نسبت به سناریوی پایه به $40/44 \text{ mg/L}$ کاهش داده است. با این وجود، اگرچه بازگشت لجن از مخزن ته‌نشینی و تبدیل مخزن بی‌هوازی دوم به واحد هوازی، غلظت فسفات خروجی را نسبت به سناریوی پایه در حدود ۷ واحد کاهش داده، اما به تنهایی نمی‌تواند راه‌حل مناسبی در رساندن غلظت فسفات خروجی به محدوده استاندارد تخلیه مجاز باشد. همچنین، مشابه با سناریوهای ۲ تا ۴، اختار کمبود نیتروژن هم در مخازن SBR و هم در واحد هوازی در این سناریو گزارش شد. بنابراین، جبران کمبود نیتروژن در این واحدها با افزودن منبع نیتروژن، یکی از مهم‌ترین تمهیدات مورد نیاز خواهد بود.

- سناریوی ۶

تمام سناریوها تا این مرحله، کمبود نیتروژن در واحدهای SBR و هواهی را نشان دادند. همچنین، افزایش حجم لجن بازگشتی به واحد بی‌هوازی چه از مخزن ته‌نشینی و چه واحد SBR نتوانست موجب افزایش حذف فسفات شود. بنابراین نیازی به هزینه اضافی در بازگشت لجن نبوده و حداقل مقدار $1/27 \text{ m}^3/\text{day}$ از مخزن



بهبود حذف فسفات در مدول دوم تصفیه‌خانه باشد.

۱۱- سناریوی ۱۱

در این سناریو، استفاده از فرایند CPPR از طریق افزودن آلومینیوم در ورودی واحد هوازی مدنظر قرار گرفت. میزان آلومینیوم تزریق شده برابر $5/77 \text{ kg/day}$ با دبی 50 L/day به هر واحد هوازی تنظیم شد. مشابه با نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی سناریوی ۱۰، غلظت فسفات در پساب خروجی به $34/92 \text{ mg/L}$ رسید. از آنجا که این میزان از حد مجاز تخلیه فسفات بیشتر است، بنابراین سناریوی ۱۱ نمی‌تواند جایگزین مناسبی در مدول دوم تصفیه‌خانه باشد.

۱۲- سناریوی ۱۲

با توجه به بهبود حذف فسفات و ناکافی بودن میزان آلومینیوم افزوده شده در سناریوی ۱۱، در این سناریو میزان آلومینیوم تزریق شده به واحد هوازی افزایش داده شد. میزان آلومینیوم تزریق شده برابر $28/85 \text{ kg/day}$ با دبی 250 L/day به هر واحد هوازی تنظیم شد. مشابه با نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی سناریوی ۱۰، غلظت فسفات در پساب خروجی به $17/59 \text{ mg/L}$ رسید که اگر چه نسبت به سناریوی قبلی شرایط بهتری را نشان می‌دهد، اما این میزان از حد مجاز تخلیه فسفات بیشتر است؛ بنابراین سناریوی ۱۲ نمی‌تواند جایگزین مناسبی برای مدول دوم تصفیه‌خانه باشد.

۱۳- سناریوی ۱۳

با توجه به بهبود حذف فسفات و ناکافی بودن میزان آلومینیوم افزوده شده در سناریوی ۱۲، در این سناریو میزان آلومینیوم تزریق شده به واحد هوازی باز هم افزایش یافت و میزان آلومینیوم تزریق شده برابر $57/7 \text{ kg/day}$ با دبی 50 L/day به هر واحد هوازی تنظیم شد. مشابه با نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی سناریوی ۱۳، غلظت فسفات در پساب خروجی در روز ۱۴م شبیه‌سازی به صفر رسید، که نسبت به سناریوهای ۱۱ و ۱۲ شرایط ایده‌آل حذف فسفات در مدول دوم تصفیه‌خانه را نشان می‌دهد. بنابراین، سناریوی ۱۳ جایگزین مناسبی برای بهبود حذف فسفات در مدول دوم تصفیه‌خانه خواهد بود و بهترین میزان افزودن آلومینیوم را به ابتدای واحد هوازی نشان می‌دهد.

را به صفر کاهش داده است. مقدار صفر فسفات در پساب خروجی مطابق نتایج به دست آمده پس از ۱۵ روز از آغاز شبیه‌سازی به دست آمد. همچنین، اختار محدودیت نیتروژن در این شبیه‌سازی گزارش نشد. بنابراین، این سناریو بهینه‌ترین سناریو برای بهبود حذف فسفات از مدول اول است.

۳-۲- سناریوهای بهینه‌سازی حذف فسفات در مدول دوم بر مبنای روش CPPR

در این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی حذف فسفات در مدول دوم بر مبنای روش CPPR، پنج سناریو (۹ تا ۱۳) تعریف شده که در شکل ۶ شماتیک آنها ارائه شده است.

۹- سناریوی ۹

با توجه به اینکه در شبیه‌سازی انجام شده در سناریوی پایه مدول دوم، کمبود نیتروژن در واحدهای MBBR و هوادهی گزارش شد و ارتباط موجود بین وجود نیتروژن کافی و حذف فسفات سناریوهای قبلی، منبع تزریق نیتروژن در ورودی واحدهای یاد شده قرار گرفت. مقدار تزریق نیتروژن آلی محلول تجزیه‌پذیر در واحدهای MBBR و هوادهی با دبی محلول $1 \text{ m}^3/\text{day}$ برای هر واحد به ترتیب ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم نیتروژن بر لیتر در نظر گرفته شد. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، افزودن منبع نیتروژن کافی به مخازن MBBR و هوادهی بدون نیاز به استفاده از فرایند ترسیب موجب کاهش غلظت فسفات در پساب خروجی به میزان صفر شده است. لازم به ذکر است که تنها پس از ۵ روز از آغاز شبیه‌سازی این نتیجه حاصل شد.

۱۰- سناریوی ۱۰

در این سناریو، استفاده از فرایند CPPR از طریق افزودن آلومینیوم در ورودی واحد UABR مدنظر قرار گرفت. میزان آلومینیوم تزریق شده برابر $5/77 \text{ kg/day}$ با دبی 50 L/day به هر واحد UABR تنظیم شد. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با اجرای سناریوی ۱۰، غلظت فسفات در پساب خروجی به $34/92 \text{ mg/L}$ رسیده است. از آنجا که این میزان از حد مجاز تخلیه فسفات بیشتر است، این سناریو نمی‌تواند جایگزین مناسبی برای



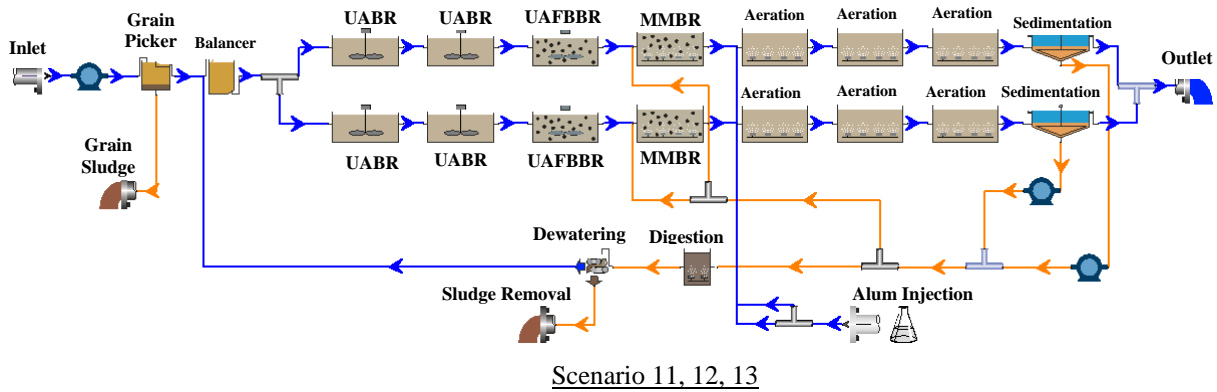
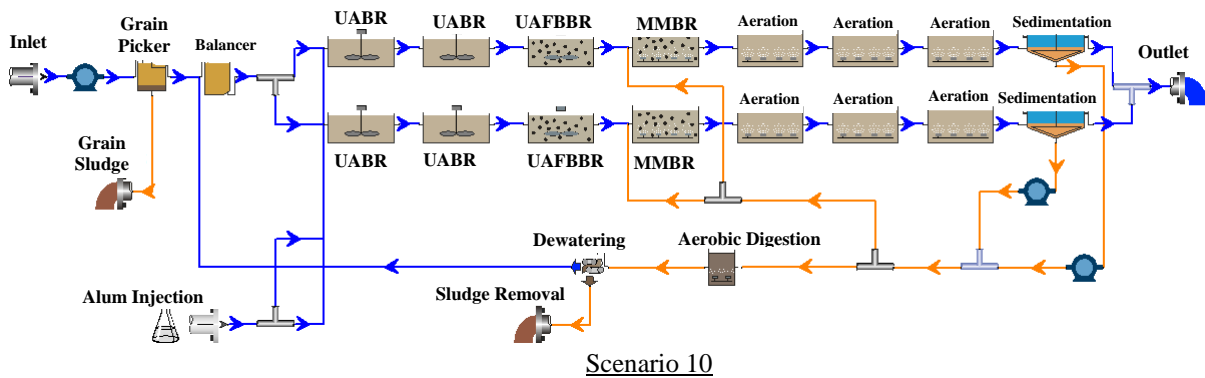
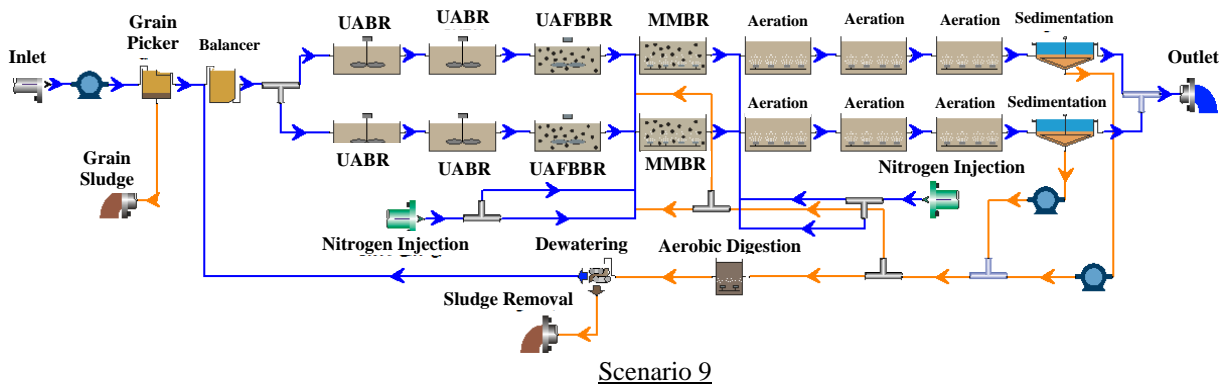


Fig. 6. Placement schematic of treatment units in different scenarios of phosphate removal optimization in the second module based on the CPPR

شکل ۶- شماتیک جانمایی واحدهای تصفیه در سناریوهای مختلف بهینه‌سازی حذف فسفات در مدول دوم بر مبنای روش CPPR



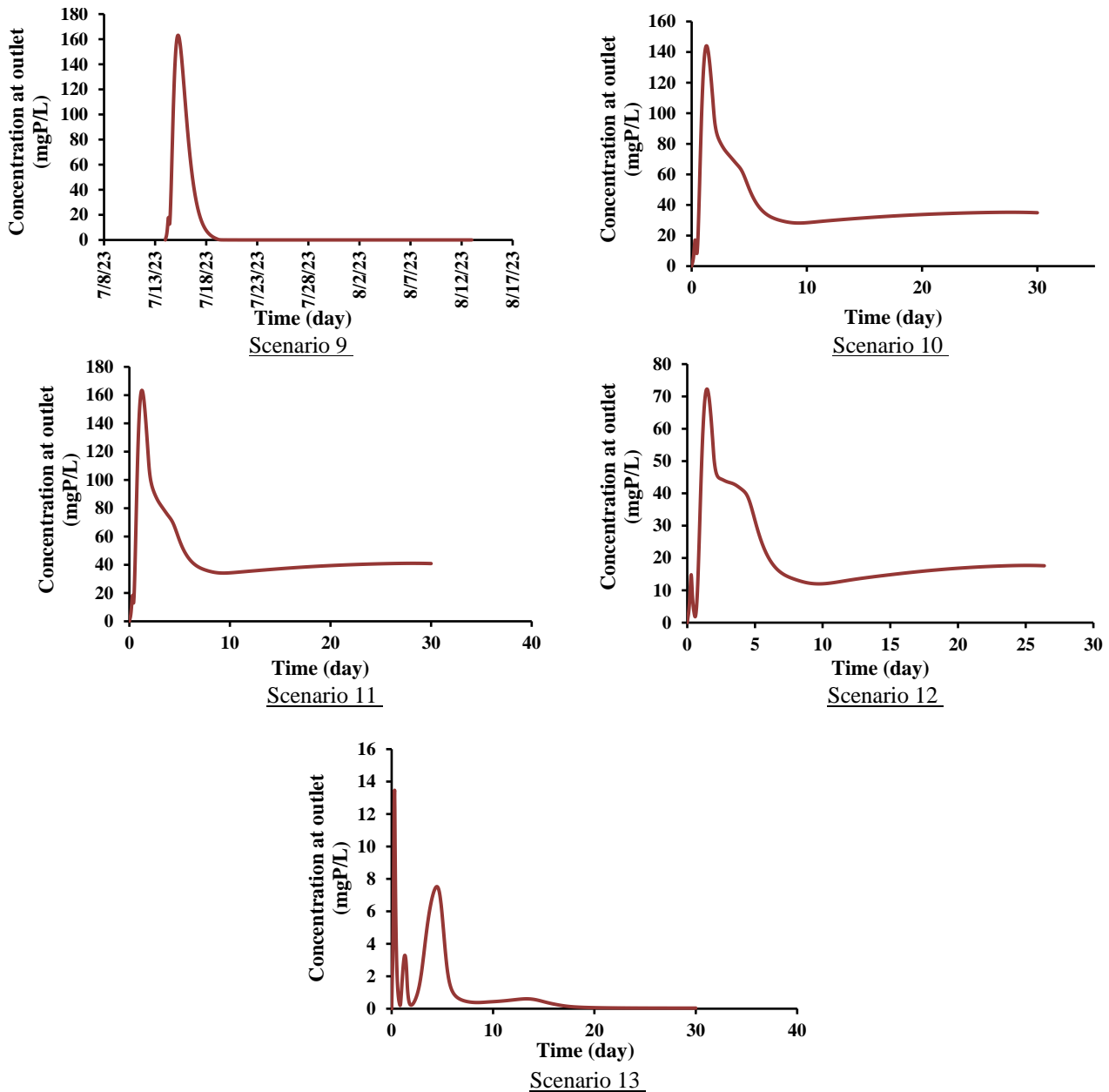


Fig. 7. Results of phosphate removal changes in 30-day dynamic simulation of different phosphate removal optimization scenarios in the second module based on CPPR

شکل ۷- نتایج تغییرات حذف فسفات در شبیه‌سازی دینامیکی ۳۰ روزه سناریوهای مختلف بهینه‌سازی حذف فسفات

در مدول دوم بر مبنای روش CPPR

۳-۳- تحلیل، مقایسه و انتخاب گزینه برتر

نتایج شبیه‌سازی وضعیت موجود بهره‌برداری از مدول اول نشان داد فسفات موجود در پساب خروجی از این مدول (حدود ۴۷ mg/L) از حد مجاز استاندارد تخلیه پساب بالاتر است. بنابراین شبیه‌سازی و تحلیل انجام شده در این پژوهش، گزاره‌های زیر در راستای

بهینه‌سازی حذف فسفات نتیجه شد:

- با توجه به وضعیت بهره‌برداری فعلی مدول اول، شرط اصلی برای پیاده‌سازی روش EBPR، بازگشت لجن به ابتدای واحد بی‌هوازی و قرار دادن یک واحد هوادهی پس از واحد بی‌هوازی است.



– در حالت بهره‌برداری فعلی، منبع نیتروژن مناسب و کافی در مخازن SBR وجود ندارد. از آنجایی که نیتروژن برای حذف بیولوژیکی ترکیبات فسفر لازم است، در ابتدا سناریوی طراحی شد که در آن با تزریق نیتروژن به مخازن SBR شرایط حذف فسفات ارزیابی شود. نتایج نشان داد غلظت فسفات در پساب خروجی به 41 mg/L رسید. بنابراین، با افزودن نیتروژن تا حد کمی حذف فسفات بهبود یافته است.

– در سناریوهای دیگر، لجن مازاد خروجی از مخزن ته‌نشینی به ابتدای واحد بی‌هوازی بازگشت داده و مخازن سری دوم بی‌هوازی به واحد هوادهی تبدیل شد تا تأثیر اجرای فرایند EBPR بر حذف فسفات بررسی شود. بازگشت مقدار مختلفی از لجن ته‌نشین شده و همچنین برگرداندن لجن خروجی از واحد SBR به ابتدای واحد بی‌هوازی نشان داد بهترین حالت، بازگرداندن 90% درصد لجن خروجی از ته‌نشینی در وضعیت فعلی بهره‌برداری با تنها $1/27 \text{ m}^3/\text{day}$ است که مقدار فسفات خروجی را به 40 mg/L رساند.

بنابراین، حذف فسفات تا حد کمی بهبود یافت. افزایش حجم لجن بازگشتی علاوه بر افزایش هزینه‌های بهره‌برداری، تأثیر منفی نیز در حذف فسفات داشته است. ضمن اینکه کمبود نیتروژن در تمامی این سناریوها در واحدهای هوازی و SBR مشاهده شد.

– با تلفیق بازگشت لجن به میزان مناسب به واحد بی‌هوازی، تبدیل واحدهای بی‌هوازی سری دوم به واحد هوازی و تزریق مقدار مختلف نیتروژن به واحد هوازی، بهترین میزان حذف نیتروژن با غلظت 10000 mg/L و دبی محلول $1 \text{ m}^3/\text{day}$ به دست آمد. در این حالت، آنالیز دینامیکی 30 روزه نشان داد، بعد از گذشت 2 هفته میزان فسفات در خروجی تصفیه‌خانه به صفر کاهش می‌یابد.

بنابر نتایج شبیه‌سازی وضعیت فعلی بهره‌برداری از مدول دوم (واحد MBBR)، گزاره‌های زیر در راستای بهینه‌سازی حذف فسفات نتیجه شد:

– در شبیه‌سازی سناریوی بهره‌برداری فعلی (پایه)، در واحدهای MBBR و هوادهی‌ها کمبود نیتروژن گزارش شد. بهینه‌ترین شرایط تزریق محلول نیتروژن 5000 mg/L با دبی 1000 L/day به واحد MBBR و محلول نیتروژن 10000 mg/L با دبی 1000 L/day به واحد هوادهی است. نتایج این حالت شبیه‌سازی مقدار فسفات در پساب خروجی را به صفر رساند. در واقع با تنظیم مقدار نیتروژن در سناریوی پایه نیازی به استفاده از فرایندهایی از قبیل EBPR یا

CPPR برای رساندن فسفات خروجی به حد استاندارد نیست. در سناریوهای بعدی با تزریق آلوم با دبی 100 L/day و غلظت $57/7 \text{ g/L}$ به ورودی واحد بی‌هوازی UABR و ورودی واحد هوادهی به صورت مجزا، مقدار فسفات در خروجی به $34/9 \text{ g/L}$ رسید که نسبت به حالت پایه مقدار آن کمتر شده، اما هنوز به حد استاندارد خروجی نرسیده است. کمبود نیتروژن در هر دو مخازن MBBR و هوادهی در این حالت گزارش شد.

– در سناریوی چهارم با تزریق آلوم با دبی 500 L/day و غلظت $57/7 \text{ g/L}$ به ورودی مخازن هوازی اول، مقدار فسفات در خروجی به $17/6 \text{ g/L}$ رسید که نسبت به حالت‌های قبلی کمتر شده، اما هنوز به حد استاندارد خروجی نرسید. کمبود نیتروژن در هر دو مخازن MBBR و هوادهی در این حالت گزارش شد.

– در سناریوی پنجم با تزریق آلوم با دبی 1000 L/day و غلظت $57/7 \text{ g/L}$ به ورودی مخازن هوازی اول، مقدار فسفات در خروجی به صفر رسید. کمبود نیتروژن در هر دو مخازن MBBR و هوادهی در این حالت گزارش شد.

– نتایج ارزیابی سناریوهای مختلف در مدول دوم تصفیه‌خانه نشان داد، هریک از راه‌حل‌های تزریق منبع نیتروژن به واحدهای MBBR و هوادهی به میزان کافی و تزریق آلوم به مخازن هوازی اول می‌تواند غلظت فسفات موجود در پساب خروجی را به صفر کاهش دهد. بنابراین انتخاب هر کدام از شرایط فوق بر اساس بررسی‌های فنی و اقتصادی می‌تواند قابل انجام باشد.

۳-۴- مقایسه نتایج با پژوهش‌های سایرین

نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های مختلف از جمله گروه پژوهشی (Midkiff, 2016) هم‌خوانی دارد. در پژوهش Midkiff مدل BioWIN برای مدل‌سازی تصفیه‌خانه Leymebamba با موفقیت استفاده شد و عملکرد آن با شرایط واقعی موجود مقایسه شد. مطابق نتایج این پژوهش، متغیرهای BOD و TSS با موفقیت برای شرایط مختلف محاسبه شد و نرم‌افزار BioWIN به خوبی توانست شرایط فعلی و تحت سناریوی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری را پیش‌بینی کند (Midkiff, 2016).

همچنین پژوهش آهنگری و همکاران، در بهینه‌سازی پساب تصفیه‌خانه فاضلاب لجن فعال شهرک صنعتی شکوهیه قم در حذف BOD_5 ، COD، TSS، کدورت و هدایت الکتریکی با استفاده از



علاوه، نوسانات تولید فاضلاب، تنوع ترکیب شیمیایی و بیولوژیک فاضلاب و متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر فرایندهای تصفیه، دستیابی به کارایی بالا را دشوار و پرهزینه ساخته است. استفاده از روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایندهای تصفیه، ابزاری ارزان، در دسترس و کارآمد برای بهبود عملکرد و ارتقای واحدهای تصفیه موجود، به ویژه واحدهای کوچک و متوسط، به شمار می‌رود.

در این پژوهش، با موفقیت از نرم‌افزار BioWIN برای مدل‌سازی یک واحد تصفیه صنعتی استفاده شد و گزینه‌های بهبود عملکرد فرایندی تصفیه در شرایط مختلف، شبیه‌سازی و تحلیل شد. در تمامی مراحل، داده‌های واقعی فاضلاب ورودی و شرایط کارکرد تصفیه‌خانه استفاده شد و در مجموع ۱۳ سناریوی مختلف بهره‌برداری طراحی و تحلیل شد. بنابر نتایج به دست آمده نرخ بازگشت لجن، میزان تزریق نیتروژن و شرایط هوازی و بی‌هوازی متغیرهای کلیدی تأثیرگذار بر کارایی تصفیه هستند که با تنظیم صحیح آن متناسب با دبی و ترکیب فاضلاب ورودی، امکان دستیابی به کارایی بالای تصفیه با حداقل هزینه فراهم خواهد شد.

۵- قدردانی

نویسندگان پژوهش از مؤسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو اصفهان، به خاطر همکاری در انجام این پژوهش، قدردانی می‌کنند. این پژوهش استخراج شده از پایان‌نامه کارشناسی ارشد بود.

منعقدکننده‌های کلرورفریک، آلوم و PAC نشان داد، کارایی منعقدکننده‌ها در حذف کدورت متفاوت بوده، اما می‌تواند بسیار مفید باشد (Ahangari et al., 2020). استفاده از منعقدکننده‌ها در این پژوهش و پژوهش آهنگری و همکاران و شبیه‌سازی تأثیر آنها با استفاده از نرم‌افزارهای معتبر طراحی سیستم‌های تصفیه فاضلاب می‌تواند نشان‌دهنده عملکرد خوب آنها در بهینه‌سازی روش‌های مختلف تصفیه قبل از عملیاتی‌سازی آنها و جلوگیری از صرف هزینه‌های قابل توجه باشد.

در پژوهش‌های متعدد دیگری در مقیاس آزمایشگاهی و یا شبیه‌سازی نرم‌افزاری، پیکربندی فرایند اکسیداسیون بی‌هوازی را برای توصیف نیتریفیکاسیون، نترات‌زدایی و حذف بیولوژیکی فسفر و درک آسیب‌های بیش از حد و گزینه‌های بازیابی انجام شده که نتایج گزارش شده آنها با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد (Bai et al., 2023, Chang et al., 2019, Yuan and Oleszkiewicz, 2008).

۴- نتیجه‌گیری

نیاز روزافزون به آب متأثر از رشد جمعیت، توسعه کشاورزی و صنعتی، توجه بیشتر به حفاظت و جلوگیری از آلوده شدن منابع آب و بازچرخانی و استفاده چند باره از پساب را ضروری ساخته است. امروزه، با توجه به پراکندگی مراکز جمعیتی و صنعتی، واحدهای تصفیه فاضلاب در مناطق جغرافیایی مختلف پراکنده هستند. به

References

- Ahangari, H. G., Pourmoghadas, H. and Fahiminia, M., 2020. Optimization of wastewater refinery in Shokoohiyeh industrial city of Qom before entering RO system using chlorophyll, alum and PAC coagulants. *Journal of Water and Wastewater*, 31(1), 76-85. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/WWJ.2019.149946.2753>.
- Ajayi, T. O. and Ogunbayo, A. O., 2012. Achieving environmental sustainability in wastewater treatment by phytoremediation with water hyacinth (*Eichhornia Crassipes*). *Journal of Sustainable Development*, 5(7), 80. <https://doi.org/10.5539/jsd.v5n7p80>.
- Alvarado, A., 2013. Advanced dynamic modelling of wastewater treatment ponds (Doctoral Dissertation, Ghent University). [Link]
- Bagheri Pardesti, E. and Tarabian, A., 2017. Optimization of West Tehran wastewater treatment plant with an emphasis on hydraulic shock and organic shock and the feasibility of increasing the capacity of the treatment plant using the MBBR process. MSc. Thesis, University of Tehran. (In Persian) [Link]



- Bai, X., McKnight, M. M., Neufeld, J. D. and Parker, W. J., 2023. Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal from municipal wastewater at low temperature. *Bioresource Technology*, 368, 128261. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128261>.
- Chang, S., Tao, T. and Wu, P., 2019. Simultaneous Nitrification, Denitrification, and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge. In Nancharaiah, Y. V. and Venugopalan, V. P., Ed. *Microbial Biofilms in Bioremediation and Wastewater Treatment*. CRC Press. pp. 49-68. <https://doi.org/10.1201/b22046-4>.
- Kılıç, B. and Çeçen, F., 2023. Review of experimental biodegradation data on pharmaceuticals and comparison with predictive BIOWIN models. *Journal of Environmental Management*, 344, 118310. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118310>.
- Knapp, L. A., 2014. Study of process control strategies for biological nutrient removal in an oxidation ditch. MSc. Thesis, University of South Florida. USA. [[Link](#)]
- Midkiff, R. C., 2016. A cultural and technical study of wastewater treatment plant maintenance in a small community in Peru. MSc. Thesis, Michigan Technological University. USA. [[Link](#)]
- Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M. S. and Olabi, A. G., 2022. The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, 7, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112>.
- Yongzhen, P., Hongxun, H., Shuying, W., Youwei, C. and Yuan, Z., 2008. Nitrogen and phosphorus removal in pilot-scale anaerobic-anoxic oxidation ditch system. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 20, 398-403. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62070-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62070-7).
- Rathore, K., 2018. Dynamic modeling of an advanced wastewater treatment plant. MSc. Thesis, University of South Florida. USA. [[Link](#)]
- Rozić, Ž., 2022. Sustainable management of the wastewater disposal system. *E-Zbornik, Elektronički Zbornik Radova Građevinskog Fakulteta*, 12(23), 1-11. <https://doi.org/10.47960/2232-9080.2022.23.12.1>.
- Silva, J. A., 2023. Wastewater treatment and reuse for sustainable water resources management: a systematic literature review. *Sustainability*, 15(14), 10940. <https://doi.org/10.3390/su151410940>.
- Tehrani, M. R. F., Vossoughi, M. and Shamsai, A., 2014. In-situ nitrate remediation using nano iron/nickel particles. *Environment Protection Engineering*, 40(3), 75-86. <https://doi.org/10.37190/epe140306>.
- Vineyard, D., Karthikeyan, K. G., Davidson, C. and Barak, P., 2024. Improving BioWin modeling of phosphorus solubilization in acid-phase digesters. *Environments*, 11(2), 31. <https://doi.org/10.3390/environments11020031>.
- Vitanza, R., Colussi, I., Coresi, A. and Gallo, V., 2015. Implementing a respirometry-based model into BioWin software to simulate wastewater treatment plant operations. *Journal of Water Process Engineering*, 9, 267-275. [[Link](#)]
- Yuan, Q. and Oleszkiewicz, J., 2008. Interaction between denitrification and phosphorus removal in a nutrient removing SBR system. *Water Environment Federation (WEFTEC)*, 43-54. <https://doi.org/10.2175/193864708788735691>.



© The Author(s)

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)