Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

The performance of sequencing batch reactors (SBR) in municipal wastewater treatment and risk assessment of SBRs effluent in agricultural irrigation

Soheila Rezaitabar[1], Mehdi Elahi[2]*

[1] Graduated Ph.D. Student, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Marine Science, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

[2] Assistant Professor, Department of Environmental Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran

Abstract

Introduction

Nowadays, with the increasing urban population on the one hand and growing water consumption per capita on the other, the use of treated wastewater has been the subject of much attention, especially in arid and semi-arid areas. The city of Yazd, in central Iran, with its hot and dry climate, is the driest major city in Iran, with annual precipitation of 50–60 mm. Since there is no surface water, the city has relied on its groundwater system. In past decades, underground aqueducts, called Qanats (a series of well-like vertical shafts, connected by gently sloping tunnels) were used to irrigate farmland in this area. Over the past few decades, the qanats have experienced decline and deletion due to low rainfall and the excessive use of groundwater resources. Considering that the qanats are failing, water shortage is a critical challenge in this area. Therefore, treated wastewater is a good alternative, especially in agricultural applications. In the Yazd municipal wastewater treatment plant (YMWTP), the stabilization ponds had been used for sewage treatment until 2013, but after that, the advanced sequencing batch reactors (SBRs) became operational, and treated wastewater and sludge are used in agricultural applications. The most important aspect of wastewater application is a concern for public health. Therefore, the main objectives of the present study are: 1) risk assessment of the SBRs effluent in agricultural irrigation based on the comprehensive pollution index (CPI) and 2) evaluation of SBRs performance and comparison with the efficiency of stabilization ponds and artificial wetlands.

Material and methods

The YMWTP is located in northern Yazd, close to the main road of Yazd airport. In the YMWTP, wastewater passes two initial treatment units including a screening and grit chamber and is then discharged into the SBRs. In the YMWTP, six SBRs are employed. The dimension of each reactor in meters is as follow length 40, width 23.7, and depth 6.6. In the SBR process, five stages including filling, reaction (mixing and aeration), settling, effluent, and idle are conducted in each reactor. The treated WW is decanted from SBR units to the disinfection section and then transferred to irrigate the green space. It should be noted that extra sludge is also discharged from the system in other treatment processes including digestion, dewatering, and drying to use in farmlands. All of these phases plus the total retention time is 4.9 h. For sample collection, composite sampling was carried out daily (every four hours) from October (2018) to September (2019). In this regard, special polyethylene bottles (1 L) for wastewater sampling were utilized to collect samples from the influent and effluent of the SBR system in the YMWTP. The American Public Health Association (APHA) method was applied To the measurement of turbidity, biological oxygen demand (BOD), total suspended solids (TSS), chemical oxygen demand (COD), ammonia (NH3), total phosphorus (TP), electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), and power of hydrogen (pH). The Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) was also used for data analysis. This study adopted a simplified approach to risk assessment named CPI. The CPI was evaluated by using the measured concentration of parameters concerning their permissible limit in irrigation wastewater quality prescribed by the department of environment of Iran (DOE) and the United States environmental protection agency (USEPA).

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Results and discussion

Based on our results, the annual average of the studied parameters in the influent, effluent, and also the percent of removal efficiency were; turbidity 173.5, 7.59, 96%, BOD 325.6, 14.9, 95%, TSS 293.7. 17.4, 94%, COD 650.2, 43.5, 93%, NH3 44.6, 5, 88%, TP 5.6, 2.6, 52%, EC 1881.1, 1463.1, 22%, TDS 981.5, 825.5, 16%, and pH 7.65, 7.27 and 5%. The results also indicated that the efficiency of SBR is higher than the stabilization ponds and artificial wetlands. Considering the DOE limits, the results of the calculation of CPI showed that the effluent from the SBR units of the YMWTP is suitable for agricultural purposes and irrigation of green spaces because the CPI rate was less than 0.5 in all months; and according to the annual average CPI (0.17), the effluent quality is in the clean category. But considering the limits set by the USEPA and the obtained average annual CPI (1.63), the quality of effluent from the YMWTP SBR units is placed in the category of medium pollution. It should be mentioned that in some months, such as Bahman and Farvardin, the monthly average of the CPI index exceeded the number of 2, and the quality of effluent was placed in the category of severe pollution. It was also found that the most effective parameters in increasing CPI are turbidity and TDS parameters. Our results revealed that the annual average of EC in the YMWTP SBRS was 1601 ± 196 µS/cm, which according to the Wilcox classification, the quality of the effluent is placed in the high salinity category; therefore, it is at the medium level for agricultural uses. According to the correlation analysis, a positive significant relationship was found between the EC and TDS and also turbidity and TSS in the influent. There was a negative significant correlation between the TSS, turbidity, and NH3 in the influent, while it was positive in the effluent. Our data showed a negative significant correlation between the TP, TDS, and NH3 in the effluent.

Conclusion

According to our results, the highest efficiency of the SBR units is in removing turbidity, BOD, TSS, and COD, respectively. Although according to the USEPA limits, the quality of the effluent from the SBR units of the YMWTP is in the medium pollution category and it is risky to use YMWTP effluent for agricultural purposes, according to the DOE limits, the quality of the effluent is in the clean category and it is suitable for agricultural use. Considering the characteristics of the treated wastewater of this city and considering the presence of many industries in the Yazd-Ardakan plain and the lack of water in this area, it is suggested that in future research, the feasibility of using treated wastewater for industrial purposes such as cooling towers, steam boilers, product production process, fire extinguishing, dust control, construction industry and artificial feeding of underground water should also be investigated.

Keywords: Comprehensive pollution index, Risk assessment, Sequencing batch reactor, Wastewater treatment

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: m.elahi@ardakan.ac.ir

Citation: Rezaitabar, S., & Elahi, M. (2023). The performance of sequencing batch reactors (SBR) in municipal wastewater treatment and risk assessment of SBRs effluent in agricultural irrigation. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(1), 84-97.
DOI: 10.22098/mmws.2022.11211.1106
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.5.7

Received: 26 July 2022, Received in revised form: 14 August 2022, Accepted: 15 August 2022, Published Online: 15 August 2022
Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 1, pp. 84-97
Publisher: University of Mohaghegh Ardabili © Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵٤٦-۲۷۸۳

کارائی روش راکتور ناپیوسته متوالی (SBR) در تصفیهٔ فاضلاب شهری و ارزیابی خطر استفاده از آن در کشاورزی

سهیلا رضائی تبار[۱]، مهدی الهی[۲*]

[۱] دانش‌آموخته دکتری، گروه محیط زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

[۲] استادیار، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

چکیده

امروزه استفادهٔ مجدد از فاضلاب گزینهٔ مناسبی برای حفظ منابع آبی موجود به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در همین راستا، تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهر یزد در ابتدا به روش برکه‌های تثبیت (لاگون) و تالاب مصنوعی شروع به کار کرده و در سال ۱۳۹۱، سیستم راکتور ناپیوسته متوالی (SBR) جایگزین آن‌ها شد. در حال حاضر بخشی از پساب خروجی از این واحدها برای آبیاری و بخش دیگر به تالاب مصنوعی این تصفیه‌خانهٔ هدایت می‌شود. با توجه به وجود برخی استانداردهای محیط‌زیستی برای استفادهٔ مجدد از پساب تصفیه شده، اصلی‌ترین اهداف پژوهش حاضر شامل بررسی میزان کارائی سیستم SBR در تصفیهٔ فاضلاب و مقایسهٔ آن با میزان کارائی دو روش برکه‌های تثبیت و تالاب مصنوعی و ارزیابی ریسک استفاده از خروجی SBRs برای مصارف کشاورزی بوده است. نمونه‌های فاضلاب ورودی و خروجی از واحدهای SBR تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهر یزد به‌مدت یک سال (۱۳۹۸-۱۳۹۷) مورد بررسی قرار گرفتند. به‌منظور اندازه‌گیری میزان Turbidity، BOD، TSS، COD، NH3، TP، EC، TDS و pH، از روش استاندارد APHA استفاده شد. نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل شدند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که میزان کارائی روش SBR در کاهش پارامترهای مورد بررسی به‌ترتیب برابر ۹۶، ۹۵، ۹۴، ۹۳، ۸۸، ۵۲، ۲۲، ۱۶ و ۵ درصد است. هم‌چنین مشخص شد که میزان کارائی روش SBR از دو روش قبلی بیش‌تر است. در پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی ریسک استفاده از پساب در کشاورزی از شاخص جامع آلودگی (CPI) استفاده شد و میانگین مقادیر به‌دست آمده از پارامترهای مورد بررسی با حد مجاز تعیین شده آن‌ها توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران (DOE) و آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (USEPA) مقایسه شد. نتایج حاصل از محاسبهٔ میانگین ماهانهٔ CPI نشان داد که بر اساس حد مجاز DOE، استفاده از فاضلاب خروجی از واحدهای SBR تصفیه‌خانهٔ شهر یزد برای مصارف کشاورزی و آبیاری فضای سبز مناسب است و کیفیت پساب در طبقهٔ تمیز قرار دارد، اما بر اساس حد مجاز USEPA، دارای ریسک است و کیفیت آب در طبقهٔ با آلودگی متوسط و در برخی ماه‌ها در طبقهٔ با آلودگی شدید قرار دارد. هم‌چنین مشخص شد مؤثرترین پارامترها در افزایش میزان CPI، پارامترهای turbidity و TDS هستند.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی ریسک، تصفیهٔ فاضلاب، راکتور ناپیوستهٔ متوالی، شاخص جامع آلودگی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.elahi@ardakan.ac.ir

استناد: رضائی‌تبار، س.، و الهی، م. (۱۴۰۲). کارائی روش راکتور ناپیوستهٔ متوالی (SBR) در تصفیهٔ فاضلاب شهری و ارزیابی خطر استفاده از آن در کشاورزی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۸۴-۹۷.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11211.1106

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.5.7

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۴، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۵/۲۴

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۱، شماره صفحه ۸۴ تا ۹۷

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

امروزه با رشد روزافزون جمعیت و به‌دنبال آن افزایش تقاضا برای آب، استفادهٔ مجدد از فاضلاب به‌عنوان یک منبع بالقوه و جایگزین مناسب برای منابع آب موجود در نظر گرفته می‌شود و منجر به ذخیرهٔ منابع آب شیرین و صرفه‌جویی در مصرف آن به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود (Alihosseini et al., 2020). بدیهی است با توجه به وجود انواع آلاینده‌ها و ناخالصی‌ها در فاضلاب‌ها، تخلیهٔ مستقیم آن‌ها به محیط‌زیست ممنوع بوده و سلامت و بهداشت اکوسیستم و انسان به‌خطر خواهد افتاد؛ لذا سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران نیز بر اساس استانداردهای آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (USEPA, 2004)[1] حد مجازهائی را برای استفادهٔ مجدد یا تخلیهٔ فاضلاب به سه منبع پذیرنده شامل: آب‌های سطحی، مزارع کشاورزی و فضای سبز و چاه جاذب وضع نموده است و پارمترهای دارای اهمیت و مقادیر آن‌ها در وب‌سایت سازمان حفاظت محیط‌زیست ارائه شده است (DOE, 2019). به‌منظور استفادهٔ مجدد از فاضلاب شهری و دستیابی به استانداردهای ملی و بین‌المللی، روش‌های مختلفی برای تصفیه وجود دارد که یکی از آن‌ها روش راکتور ناپیوسته متوالی (SBR)[2]است. سیستم SBR نوعی از فرآیند لجن فعال است که در آن بر اساس دوره‌های زمانی مشخص کاری، فرآیند حذف مواد آلی و مغذی به روش بیولوژیکی اتفاق می‌افتد. به‌دلیل کارائی بالای سیستم SBR، مقبولیت این روش برای تصفیهٔ فاضلاب شهری روز به روز در حال افزایش است و در سراسر دنیا با اقبال مواجه شده است (Eslami et al., 2015a). شهر یزد واقع در فلات مرکزی ایران، با اقلیمی گرم و خشک، دارای میانگین بارش سالانه ۵۰ تا ۶۰ میلی‌متر است. این شهر فاقد هر گونه آب سطحی بوده و آب این شهر در گذشته بیش‌تر از طریق منابع زیرزمینی و قنات تأمین می‌شد. با توسعه صنایع و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و کاهش ذخایر آب زیرزمینی، در حال حاضر در برخی از ماه‌ها آب شرب این استان از طریق انتقال آب لوله‌کشی از استان اصفهان تأمین می‌شود. هم‌چنین صنعت چادرملو نیز اقدام به شیرین‌سازی آب و انتقال آن از خلیج فارس کرده است. با توجه به بحران کمبود آب در استان یزد از یک سو و نظر به اثر بخشی پساب در باردهی بیش‌تر زمین‌های کشاورزی از سوی دیگر، استفادهٔ مجدد از فاضلاب در بخش کشاورزی این شهر امری ضروری بوده است (Shahraki et al., 2011; Sadeghi et al., 2012; Miri et al., 2016). سیستم تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهر یزد در ابتداء به روش برکه‌های تثبیت (لاگون) در سال ۱۳۸۱ تاسیس شد و هم‌زمان در کنار آن تالاب مصنوعی با کاشت نی مورد بهره‌برداری قرار گرفت (Eslami et al., 2015b). سپس در سال ۱۳۹۱ سیستم SBR جایگزین آن‌ها شده و در مدار بهره‌برداری قرار گرفت (Eslami et al., 2015a). پساب ورودی به واحدهای SBR تصفیه‌خانهٔ شهر یزد پس از تصفیه، برای دو کاربری مختلف به خارج از مجموعه هدایت می‌شود. بخشی از این پساب برای آبیاری فضای سبز و مصارف کشاورزی به زمین‌های مورد نظر هدایت شده و بخشی از آن به تالاب مصنوعی موجود در نزدیکی این تصفیه‌خانه منتقل می‌شود. تالاب مصنوعی شهر یزد که حدوداً در فاصله ۱/۵ کیلومتری و در جهت شمالی واحدهای SBR تصفیه‌خانه قرار گرفته است؛ به‌دلیل دریافت همیشگی پساب تصفیه شده، دائمی بوده و طول آن حدود سه کیلومتر و عرض آن در بیش‌ترین حالت یک کیلومتر است. وجود یک محدودهٔ آبی با مساحتی بالغ بر ۲۰۰ هکتار در اقلیم خشک و بیابانی یزد بسیار ارزشمند و حائز اهمیت بوده و منجر به افزایش سطح تنوع زیستی منطقه شده و گونه‌های گیاهی و پرندگان متعددی را در خود جای داده است و همین امر منجر به ایجاد شرایط توریستی و گردش‌گری و پرنده‌نگری در منطقه شده است (Akbari et al., 2014; Salari et al., 2022). لازم به‌ذکر است که تاکنون مطالعات متعددی به بررسی کارائی روش تالاب مصنوعی و برکهٔ تثبیت تصفیه‌خانهٔ شهر یزد و امکان‌سنجی استفاده از پساب آن‌ها برای مصارف کشاورزی پرداخته‌اند. Sobhan et al. (2013) در پژوهشی دیگر میزان کارائی گیاه لوئی را در تصفیهٔ فاضلاب تالاب زیرسطحی تصفیه‌خانهٔ شهر یزد مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد راندمان حذف PO4-P ۴۰، NH3-N ۲۵، TSS ۸۵، BOD ۹۴ و COD ۵۹ درصد بوده است. در مطالعه‌ای دیگر میزان راندمان حذف آمونیاک و فسفات در تالاب مصنوعی دارای نی تصفیه‌خانهٔ شهر یزد به‌ترتیب ۱۹/۹۹ و ۵/۶۳ درصد گزارش شد (Farzadkia et al., 2013). در پژوهشی دیگر در دو فصل بهار و تابستان میزان کارائی برکه‌های تثبیت تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهر یزد توسط Farzadkia et al. (2014) مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس پژوهش آن‌ها میانگین BOD، COD و TSS در فاضلاب ورودی به‌ترتیب ۲۷۲/۰۸، ۵۷۷/۱۳ و ۲۵۸/۶ و در فاضلاب خروجی به‌ترتیب ۶۹/۰۲۵، ۱۳۶/۷۵ و ۱۳۶/۵ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شد. به‌عبارتی بر اساس پژوهش آن‌ها میزان راندمان حذف BOD، COD و TSS به‌ترتیب ۷۴/۶۳، ۷۶/۳۰ و ۴۷/۲۱ درصد به‌دست آمد.

باتوجه به دو کاربرد عمدهٔ پساب خروجی از واحدهای SBR تصفیه‌خانهٔ شهر یزد (آبیاری فضای سبز و مصارف کشاورزی و تالاب مصنوعی)، هدف اول پژوهش حاضر بررسی میزان کارائی

[1] Environmental Protection Agency
[2] Sequencing Batch Reactor

سیستم تصفیهٔ SBR در کاهش مقادیر پارامترهای فیزیکی و شیمیائی شامل اکسیژن‌خواهی بیوشیمیائی (BOD)[1]، اکسیژن خواهی شیمیائی (COD)[2]، pH[3]، هدایت الکتریکی (EC)[4]، کدورت (Turbidity)، کل جامدات محلول (TDS)[5]، کل جامدات معلق (TSS)[6]، آمونیاک (NH3) و فسفر کل (TP)[7] و مقایسهٔ آن با کارائی سیستم‌های قبلی؛ یعنی برکه‌های تثبیت و تالاب مصنوعی است. هدف مهم دیگر این پژوهش ارزیابی ریسک استفاده از فاضلاب خروجی سیستم SBR برای مصارف کشاورزی با به‌کارگیری شاخص جامع آلودگی (CPI)[8] است. این شاخص نشان‌دهندهٔ فاصلهٔ پارامترهای فیزیکی و شیمیائی فاضلاب با استانداردها یا حد مجازهائی[9] است (Shakir et al., 2017; Vaseghi et al., 2021) که توسط سازمان‌های ملی یا بین‌المللی تعیین شده است. در پژوهش حاضر برای ارزیابی ریسک استفاده از پساب تصفیه شده در بخش کشاورزی از حد مجازهای سازمان حفاظت محیطزیست ایران (DOE, 2019) و آژانس حفاظت محیطزیست آمریکا (USEPA, 2004) برای آبیاری استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محل نمونه‌برداری

تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهر یزد، در شمال غرب این شهر (عرض جغرافیائی ″۵۸′۴۴ °۳۱ و طول جغرافیائی ″۵۴°۱۸′۱۷) و در بزرگراه آیت‌الله فقیه خراسانی و در ۷/۵ کیلومتری دروازه قرآن یزد واقع شده است (Farzadkia et al., 2014). در شکل ۱ موقعیت قرارگیری تصفیه‌خانه نسبت به شهر یزد نمایش داده شده است.

در تصفیه‌خانهٔ شهر یزد، فاضلاب پس از آشغالگیری و دانه‌گیری وارد حوضچه‌های بیولوژیک (SBR) به‌طول ۴۰ متر، عرض ۲۳/۷۵ متر و عمق ۶/۶ متر می‌شود. SBR گونه‌ای از سیستم لجن فعال است که در آن فاضلاب به‌صورت پیوسته در راکتور پر و به‌صورت ناپیوسته خالی می‌شود. در این روش فاضلاب به داخل یک راکتور تخلیه شده و پس از طی مراحل تصفیهٔ بیولوژیکی و فیزیکی (ته‌نشینی) از راکتور خارج می‌شود. کلیهٔ مراحل یکنواخت‌سازی، هوادهی و زلال‌سازی در داخل یک راکتور انجام می‌گیرد. پس از بارگیری راکتور[10] عملیات تصفیه شروع می‌شود. پس از انجام عملیات اختلاط[11] هوادهی[12]، مراحل تصفیه بیولوژیکی پایان یافته و عملیات ته‌نشینی[13] شروع می‌شود و این وضعیت تا تخلیهٔ کامل پساب زلال[14] ادامه می‌یابد. لجن مازاد در هر تناوب کاری از سیستم تخلیه می‌شود. در شکل ۲ طرح شماتیک بخش‌های مختلف تصفیه‌خانهٔ شهر یزد و هم‌چنین مراحل مختلف فرآیند تصفیه در هر واحد SBR ارائه شده است (Takdastan et al., 2011; Eslami et al., 2015a).

۲-۲- زمان و نحوهٔ نمونه‌برداری

نمونه‌برداری مرکب به‌صورت روزانه و به‌مدت یک سال از مهر ۱۳۹۷ تا شهریور ۱۳۹۸ انجام گرفت. نمونهٔ فاضلاب ورودی، از کانال ورودی فاضلاب و از بخش آشغال‌گیری و نمونهٔ فاضلاب تصفیه شده از بخش خروجی واحدهای SBR طی ۲۴ ساعت به‌صورت هر چهار ساعت یک‌بار نمونه‌برداری شد. نمونه‌های برداشت شدهٔ فاضلاب ورودی و خروجی (به‌طور جداگانه) با یک‌دیگر ترکیب شده و تشکیل یک نمونهٔ مرکب را دادند. در نهایت یک لیتر از نمونه‌های مرکب به‌منظور انجام تحلیل‌های مورد نظر به آزمایشگاه منتقل شدند (Eslami et al., 2015b).

۲-۳- تحلیل نمونه‌ها

به‌منظور اندازه‌گیری کلیهٔ پارامترهای فیزیکی و شیمیائی مذکور، از روش APHA (1999)[15] استفاده شد. در جدول ۱ پارامترهای مورد بررسی، روش و دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری آن‌ها به‌طور خلاصه آمده است.

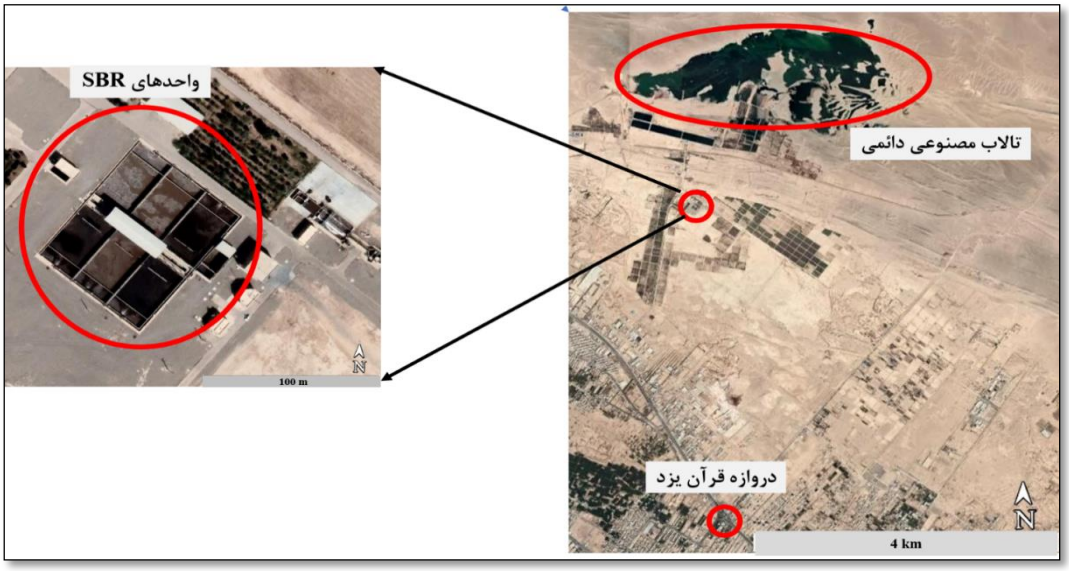
۲-۴- تحلیل داده‌ها

به‌منظور محاسبهٔ میزان کاهش یا حذف پارامترهای مورد بررسی، میانگین سالانهٔ هر پارامتر در پساب خروجی تقسیم بر مقدار آن در فاضلاب ورودی شد، از عدد یک کسر و نهایتاً به‌صورت درصد محاسبه شد. هم‌چنین برای محاسبهٔ شاخص جامع آلودگی از رابطهٔ (۱) استفاده شد:

$$CPI = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} PI \qquad (۱)$$

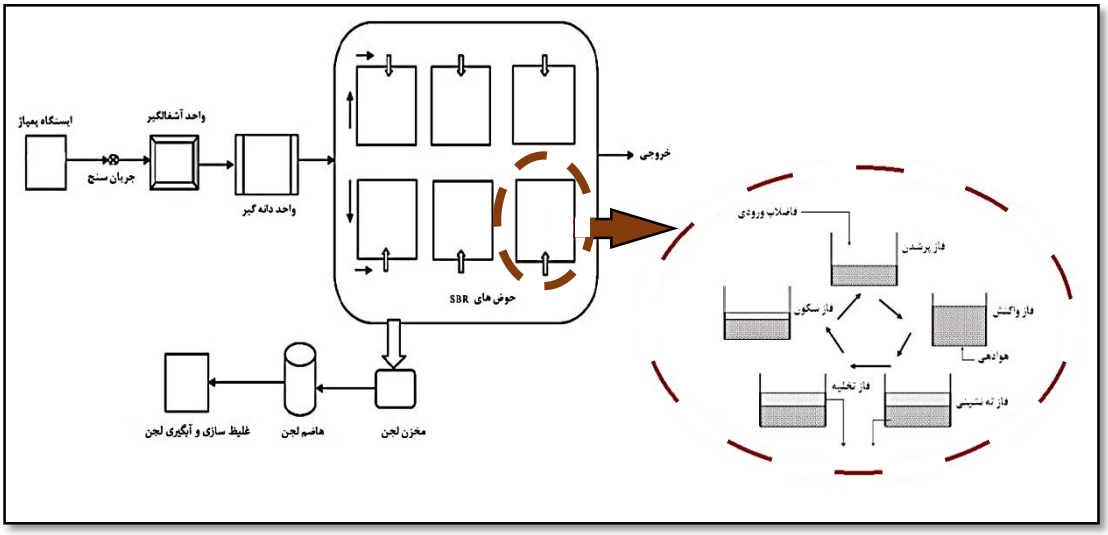
که در این رابطه، PI نسبت پارامترهای موجود به مقدار استاندارد آن و n تعداد پارامترهای مورد بررسی است (Shakir et al., 2017). هر چه میزان این شاخص بیش‌تر باشد، سطح آلودگی بالاتر و فاصله بیش‌تر با مقادیر استاندارد را نشان می‌دهد که در

[1] Biochemical oxygen demand
[2] Chemical oxygen demand
[3] Power of Hydrogen
[4] Electrical conductivity
[5] Total dissolved solids
[6] [1]Total suspended solids
[7] [2]Total phosphorus
[8] [3]Comprehensive Pollution Index
[9] [4]Recommended limits
[10] [5] Filling
[11] Mixing
[12] Aeration
[13] Setteling
[14] Draining/Decanting
[15] American Public Health Association



شکل ۱- موقعیت قرارگیری تصفیه‌خانه و تالاب مصنوعی نسبت به شهر یزد

Figure 1- The location of the treatment plant and artificial wetland in the city of Yazd



شکل ۲- طرح شماتیک بخش‌های مختلف تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهر یزد و مراحل مختلف فرآیند تصفیه در هر واحد SBR

Figure 2- Schematic plan of different parts of Yazd municipal wastewater treatment plant and different stages of the treatment process in each SBR unit

جدول ۱- روش تحلیل و دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری پارامترهای مورد مطالعه

Table 1- Analysis method and instruments used to measure the studied parameters

پارامتر	روش تحلیل	دستگاه اندازه‌گیری
BOD	APHA, 1999 (2510 D)	انکوباتور و بطری سنسوردار
COD	APHA, 1999 (5220 B)	هضم برگشتی باز و تیتراسیون
EC	APHA, 1999 (2510 A)	دستگاه EC متر
NH3	APHA, 1999 (4500 C)	اسپکتروفوتومتر
pH	APHA, 1999 (4500-H^+ B)	دستگاه pH متر
TDS	APHA, 1999 (2540 C)	وزن‌سنجی
TSS	APHA, 1999 (2540 D)	وزن‌سنجی
TP	APHA, 1999 (4500 p.4)-(4500 P.E)	اسپکتروفوتومتر
Turbidity	APHA, 1999 (2130 B)	دستگاه کدورت‌سنج

این پژوهش، از این رابطه برای ارزیابی ریسک استفاده از فاضلاب برای آبیاری فضای سبز و مصارف کشاورزی استفاده شده است. به‌منظور تعیین کیفیت پساب تصفیه شده برای کشاورزی بر اساس مقدار EC نیز از شاخص Wilcox (1955) استفاده شد.

هم‌چنین، به‌منظور تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار SPSS نسخهٔ ۲۳ استفاده شد. ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیروویلک[1] بررسی شد. به‌منظور مقایسهٔ مقادیر پارامترهای مورد بررسی با حد مجازهای تعیین شده از آزمون تی یک نمونه‌ای[2] استفاده شد. به‌منظور مقایسهٔ میزان پارامترهای مورد بررسی در فاضلاب ورودی و خروجی آزمون تی گروه‌های مستقل[3] به‌کار گرفته شد. برای بررسی روابط همبستگی نیز از آزمون پیرسون[4] استفاده شد. به‌منظور مقایسهٔ میانگین غلظت پارامترهای مورد بررسی در چهار فصل مورد مطالعه، ابتدا همگن بودن داده‌ها با استفاده از آزمون لون[5] بررسی شد. با توجه به همگن نبودن اکثر گروه داده‌ها، از بخش آزمون دانت T3[6] استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- میانگین ماهانهٔ پارامترها

نتایج حاصل از میانگین ماهانهٔ پارامترهای مورد بررسی و هم‌چنین حد مجاز سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران (DOE, 2019) و آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (USEPA, 2004) برای رهاسازی پساب تصفیه شده برای آبیاری و مصارف کشاورزی، در جدول ۲ ارائه شده است.

۳-۲- بررسی راندمان روش SBR

بر اساس نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر، درصد راندمان حذف پارامترها در واحدهای SBR از کم‌ترین به بیش‌ترین مقدار عبارت است از: pH ۵ درصد، TDS ۱۶ درصد، EC ۲۲ درصد، TP ۵۲ درصد، NH3 ۸۸ درصد، COD ۹۳ درصد، TSS ۹۴ درصد، BOD ۹۵ درصد و Turbidity ۹۶ درصد. هم‌چنین نتایج نشان داد BOD و COD در پائیز، EC، pH و TDS در زمستان، NH3، TSS و turbidity در تابستان و TP در بهار بیش‌ترین راندمان حذف را داشته‌اند. بر اساس نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر و با در نظر گرفتن پارامترهای مورد مطالعه، اختلاف معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بین پارامترهای فاضلاب ورودی و خروجی یافت شد که این مطلب بیانگر کارآمدی فرآیند تصفیهٔ SBR، در حذف پارامترهای مورد مطالعه است.

لازم به‌ذکر است Eslami et al. (2015a) نیز با اندازه‌گیری میزان BOD و COD فاضلاب ورودی و خروجی به بررسی راندمان حذف توسط واحدهای SBR تصفیه‌خانهٔ شهر یزد پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد کارائی سیستم SBR در حذف میزان BOD و COD ۹۲/۹۵ و ۹۰/۰۶ درصد است که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

۳-۳- مقایسهٔ روش تصفیهٔ SBR با تالاب مصنوعی و برکهٔ تثبیت

یکی از اهداف پژوهش حاضر مقایسهٔ میزان کارائی روش تصفیهٔ SBR (در کاهش پارامترهای مورد مطالعه) با دو روش قبلی یعنی تالاب مصنوعی (زیرسطحی) و برکه‌های تثبیت است، لذا در این بخش ویژگی‌های هر روش به‌طور مختصر بیان شده و با نتایج پژوهش‌های قبلی مقایسه شده است.

به‌طور کلی تالاب مصنوعی به پهنهٔ آبی اطلاق می‌شود که توسط آب با منشأ انسانی اشباع شده و شرایط رشد گیاه در آن فراهم است (Red et al., 1996). دو امتیاز ویژه تالاب‌های مصنوعی عبارتند از: هزینه‌های احداث و کاربری کم و قابلیت تصفیهٔ پساب جوامع کوچک و بزرگ. از معایب این تالاب‌ها می‌توان به سرعت پائین آن در تصفیهٔ فاضلاب اشاره کرد. تالاب‌های مصنوعی به سه شکل کلی جریان افقی سطحی و زیرسطحی[7]، جریان عمودی[8] و کلک شناور[9] وجود دارند که در پژوهش Shutes (2001) تشریح شده‌اند. یکی دیگر از ارزان‌ترین و آسان‌ترین راهکارها برای تصفیهٔ پساب، روش برکهٔ تثبیت (لاگون) است. برای استفاده از این روش گودال‌های خاکی با دیواره‌های مقاوم متناسب با کیفیت پساب مورد نظر برای تصفیه ایجاد می‌کنند. به این گودال‌های خاکی که برای تجمع و انباشته شدن پساب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، اصطلاحاً برکهٔ تثبیت فاضلاب یا WSP[1] می‌گویند. نحوهٔ کار این برکه‌ها بدین‌صورت است که فاضلاب پس از انباشته شدن در برکه، تثبیت شده و با گذشت زمان مواد آلی و آلاینده‌هایی که در آن موجود است توسط باکتری‌های بی‌هوازی و هوازی و جلبک‌ها تجزیه شده و در کف گودال ته‌نشین می‌شوند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این برکه‌ها عدم استفاده از مواد شیمیایی و تجهیزات و دستگاه‌های پیشرفته در آن‌هاست (Spellman and Drinan, 2014). تفاوت اساسی بین سیستم‌های مدرن تصفیهٔ فاضلاب (SBR) و سیستم‌های تالاب مصنوعی و برکه‌های تثبیت در این

[1] Shapiro-wilk
[2] One-Sample T test
[3] Independent sample T test
[4] Pearson
[5] Levene Test
[6] [0]Dunnett's T3

[7] Horizontal surface and subsurface flow
[8] Vertical flow
[9] Floating raft
[1] Wastewater stabilization ponds

است که در سیستم‌های مدرن، فاضلاب در راکتورهای کم حجم و با مصرف انرژی زیاد و با مدیریت بالا به‌سرعت تصفیه می‌شود، اما در سیستم‌های تالاب مصنوعی و برکه‌های تثبیت، فاضلاب با سرعت کند و اساساً بدون نیاز به مدیریت و در محیط‌های طبیعی تصفیه می‌شود (Farzadkia et al., 2013).

در پژوهشی که توسط Eslami et al. (2015b) انجام شد میزان کارائی تالاب مصنوعی هم از نظر راندمان حذف پارامترهایی مانند BOD، COD، TSS، NH3-N، PO4 و NO3-N و هم از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه‌تر از روش برکه‌های تثبیت گزارش شد. هم‌چنین نتایج مطالعه Tsalkatidou et al. (2009) در تصفیه‌خانه‌ای در یونان نیز نشان داد که عملکرد تالاب‌های مصنوعی در کاهش میزان BOD و TSS بهتر از برکه‌های تثبیت است. Sanaei et al. (2009) نیز تلفیق روش تالاب مصنوعی و برکه تثبیت را روشی مناسب برای تصفیهٔ فاضلاب عنوان کردند که هر کدام از آن‌ها به‌طور جداگانه، قابلیت عملکرد کاملاً مطلوب را نخواهند داشت. با در نظر گرفتن نتایج حاصل از پژوهش حاضر و با توجه به نتایج پژوهش‌های قبلی بر روی تالاب مصنوعی و برکه‌های تثبیت در تصفیه‌خانهٔ شهر یزد (که در بخش مقدمه اشاره شد) می‌توان نتیجه گرفت میزان کارائی واحدهای SBR در مورد پارامترهای مورد بررسی بیش‌تر از تالاب مصنوعی و برکه‌های تثبیت است. به‌عبارتی، بهترین کارائی در حذف یا کاهش پارامترهای مورد بررسی به‌ترتیب مربوط به روش SBR، تالاب مصنوعی و برکه‌های تثبیت است.

جدول ۲- میانگین ماهانهٔ پارامترهای فیزیکی و شیمیائی فاضلاب تصفیه‌خانهٔ شهر یزد و حد مجاز آن‌ها

Table 2- Monthly average of physical and chemical parameters of Yazd municipal wastewater treatment plant and maximum allowable concentration

ماه	نوع فاضلاب	BOD (میلی‌گرم بر لیتر)	COD (میلی‌گرم بر لیتر)	EC (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)	NH3 (میلی‌گرم بر لیتر)	pH	TDS (میلی‌گرم بر لیتر)	TSS (میلی‌گرم بر لیتر)	TP (میلی‌گرم بر لیتر)	Turbidity (واحد کدورت نفلومتریک)
حد مجاز ایران	خروجی (برای آبیاری)	100	200	–	–	8.5	–	100	–	50
حد مجاز USEPA	خروجی (برای آبیاری)	≤ 30	–	–	–	6–9	500- 2000	≤ 30	–	≤ 2
مهر 1397	ورودی	358	635	2104	46.4	7.64	1069	305	5.7	166
	خروجی	9	39	1858	4	7.34	935	13	2.71	6
آبان 1397	ورودی	351	633	1931	47.6	7.7	986	290	6.2	164
	خروجی	10	37	1550	5.9	7.5	778	12	3.45	6
آذر 1397	ورودی	357	696	1924	44	8	972	306	5.7	176
	خروجی	12	41	1714	5.6	7.44	851	20	3.62	10
دی 1397	ورودی	356	668	1877	45	7.52	926	324	5.6	181
	خروجی	13.5	46	1712	5.45	6.95	835	21.2	3.27	8.35
بهمن 1397	ورودی	298	611	1980	40	7.6	1076	316	4.8	199
	خروجی	12.5	53	1730	7.5	7	930	30	2.3	12.4
اسفند 1397	ورودی	340	665	2762	40.3	7.7	1425	353	5.55	211
	خروجی	12.25	46.5	1850	6.7	7.35	903	17.5	0.83	8.5
فروردین 1398	ورودی	279	303	1997	45.3	8.19	1170	303	6.55	177.5
	خروجی	22	44.5	1765	10	7.82	1047.5	22	1.07	10.7
اردیبهشت 1398	ورودی	346	650.5	1868	48.6	7.95	1030	229	5.32	139
	خروجی	13	50	1575	6.3	7.25	887	19	1.26	7.65
خرداد 1398	ورودی	308	539	1551	49.1	7.37	792	237	6.52	153
	خروجی	22	42	1314	3.68	7.30	670	15	3.25	6.4
تیر 1398	ورودی	287	663	1591	50.8	7.53	806	260	5.5	158
	خروجی	16.75	38	1428	1.8	7.08	719	13.5	3.09	4.61
مرداد 1398	ورودی	299	669	1573	40.9	7.7	796	286	5.14	172
	خروجی	19.25	42.5	1388	1.8	7.2	706.5	13.5	3.32	5.36
شهریور 1398	ورودی	329	735	1416	38	7.3	730	316	5.08	186
	خروجی	17	43	1339	2.09	7.04	645	12.25	3.72	5.21

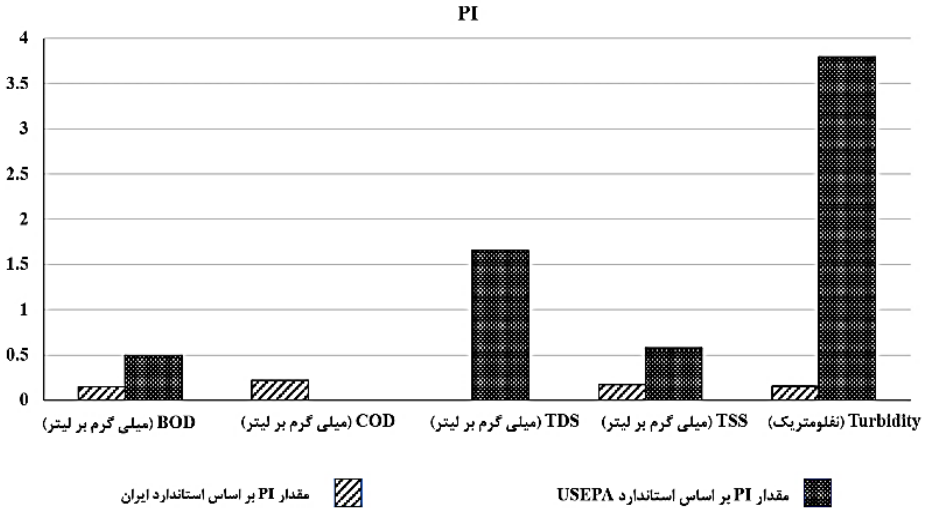
۳-۴- ارزیابی ریسک استفاده از پساب خروجی واحدهای SBR

برای برخی پارامترهای فیزیکی و شیمیائی فاضلاب تصفیه شده، حد مجازهائی توسط سازمان حفاظت محیطزیست ایران تعیین شده است که از آن جمله می‌توان به BOD، COD، pH، TSS و Turbidity اشاره کرد (جدول ۲). هم‌چنین آژانس حفاظت محیطزیست آمریکا نیز برای میزان BOD، pH، TSS، Turbidity و TDS حد مجاز تعیین کرده است (جدول ۲).

یکی از روش‌های مقایسهٔ میزان پارامترهای فیزیکی و شیمیائی فاضلاب با مقادیر حد مجاز آن‌ها، استفاده از شاخص جامع آلودگی (CPI) است (Shakir et al., 2017; Vaseghi et al., 2021) که هر چه به عدد یک نزدیک‌تر باشد، بیان‌گر نزدیک‌تر بودن مقادیر پارامترهای مورد بررسی به حد مجازشان بوده و در نتیجه کیفیت پساب پائین‌تر است. بدیهی است هر چه مقدار این شاخص از عدد یک بزرگتر باشد، میزان آلودگی پساب نیز بالاتر خواهد بود. بر اساس این شاخص، کیفیت آب در پنج طبقه شامل تمیز (۲-۰/۰)، تقریبا تمیز (۴-۰/۲۱)، کمی آلوده (۱-۰/۴۱)، آلودگی متوسط (۲-۱/۰۱) و آلودگی شدید (بیش‌تر از ۲) قرار می‌گیرد (You et al., 2009). در پژوهش حاضر نیز به‌منظور ارزیابی ریسک استفاده از پساب خروجی از واحدهای SBR تصفیه‌خانهٔ شهر یزد برای آبیاری از این شاخص استفاده شد.

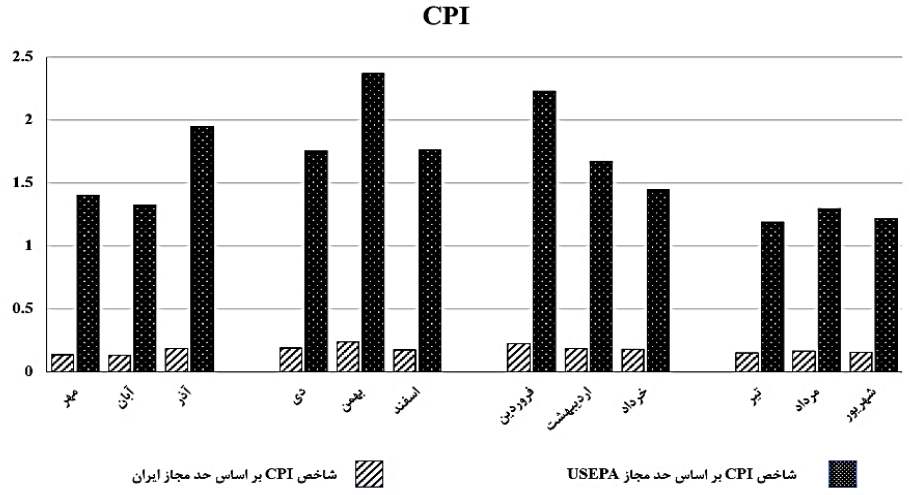
لازم به‌ذکر است با وجود این‌که پارامتر pH از فاکتورهای مهم در ارزیابی کیفیت پساب بوده و دارای حد مجاز است، ولی با توجه به اینکه سطح مطلوب آن در یک حد وسط قرار داشته و فاصله از این مقدار نامطلوب خواهد بود، به همین دلیل در این پژوهش پارامتر pH، برای ارزیابی ریسک و محاسبهٔ شاخص CPI در نظر گرفته نشد؛ زیرا بر اساس شاخص CPI، نزدیک بودن میزان پارامتر به حد مجاز، نشان‌دهندهٔ نامطلوب‌تر بودن فاضلاب است که در مورد پارامتر pH عکس این موضوع صادق است. از طرفی با توجه به استاندارد ایران و USEPA مقدار pH در پساب خروجی واحدهای SBR تصفیه‌خانهٔ شهر یزد در دامنهٔ استاندارد قرار داشت.

به‌منظور محاسبهٔ میزان CPI (بر اساس رابطهٔ ۱) با توجه به غلظت پارامترهای دارای حد مجاز در فاضلاب خروجی (بر اساس استاندارد سازمان حفاظت محیطزیست ایران و آمریکا)، ابتدا مقادیر PI محاسبه شد. در پژوهش حاضر برای محاسبهٔ میزان PI مربوط به پارامتر TDS، حد کمینهٔ مجاز تعیین شده توسط USEPA (2004) (یعنی ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) در نظر گرفته شد. در شکل ۳ میانگین سالانهٔ PI محاسبه شده برای پارامترهای دارای حد مجاز نمایش داده شده است. سپس بر اساس رابطهٔ ۱، مقادیر CPI (بر اساس استاندارد ایران و آمریکا به‌طور جداگانه) به‌صورت ماهانه محاسبه شد که در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳- میانگین سالانهٔ PI برای پارامترهای دارای حد مجاز

Figure 3- The annual average of PI for parameters with recommended limits



شکل ۴- میانگین ماهانهٔ CPI بر اساس حد مجاز ایران و USEPA

Figure 4- The monthly average of CPI based on the recommended limits by DOE and the USEPA

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با در نظر گرفتن حد مجازهای تعیین شده توسط سازمان حفاظت محیطزیست ایران، میزان CPI در همه ماه‌ها از عدد ۰/۵ کم‌تر بوده است؛ بنابراین، استفاده از پساب خروجی از واحدهای SBR تصفیه‌خانهٔ شهر یزد برای آبیاری فضای سبز و کشاورزی ایمن و برای محیطزیست بدون خطر است و با توجه به میانگین سالانهٔ CPI (۰/۱۷) کیفیت پساب در طبقهٔ تمیز قرار می‌گیرد. اما با در نظر گرفتن حد مجاز تعیین شده توسط USEPA، میزان CPI در همه ماه‌ها از عدد یک بالاتر بوده و نشان‌دهندهٔ آن است که استفاده از پساب خروجی از واحدهای SBR برای آبیاری فضای سبز و کشاورزی دارای ریسک بوده و به‌عبارتی برای سلامت اکوسیستم مضر است و با توجه به میانگین سالانهٔ CPI (۱/۶۳) کیفیت پساب در طبقهٔ آلودگی متوسط قرار می‌گیرد. لازم به‌ذکر است در برخی ماه‌ها، مانند بهمن و فروردین، متوسط ماهانهٔ شاخص CPI از عدد دو نیز فراتر رفته و کیفیت پساب در طبقهٔ با آلودگی شدید قرار گرفت. بر اساس نتایج تحقیق حاضر موثرترین پارامترهای تاثیرگذار بر میزان CPI (بر اساس حد مجازهای USEPA) شامل turbidity و TDS بوده است. هم‌چنین نتایج آزمون آماری نیز نشان داد با در نظر گرفتن حد مجاز تعیین شده توسط USEPA، میزان turbidity و TDS به‌طور معنی‌داری بیش از حد مجاز است ($P> 0.05$).

هم‌چنین در پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی کیفیت پساب تصفیه شده برای مصارف کشاورزی از نظر میزان شوری و EC از روش Wilcox (1955) استفاده شد. در جدول ۳، دامنه EC و کیفیت آب برای مصارف کشاورزی، بر اساس طبقه‌بندی ویلکاکس ارائه شده است.

جدول ۳- طبقه‌بندی کیفیت آب از نظر میزان EC بر اساس روش ویلکاکس

Table 3- Classification of water quality based on the EC value according to the Wilcox method

دامنه (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)	نوع	کیفیت برای کشاورزی
<250	شوری کم	عالی
250-750	شوری متوسط	خوب
750-2250	شوری بالا	متوسط
>2250	شوری بسیار بالا	بد

با توجه به نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر، میانگین سالانهٔ میزان EC در پساب خروجی از واحدهای SBR تصفیه‌خانهٔ یزد ۱۹۶ ± ۱۶۰۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود که بر اساس طبقه‌بندی ویلکاکس کیفیت پساب خروجی در طبقهٔ با شوری بالا قرار می‌گیرد که برای مصارف کشاورزی در سطح متوسط قرار دارد.

Anbir and Noori (2018) نیز به بررسی کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانهٔ شهرک اکباتان پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که میزان پارامترهای دارای حد مجاز محیطزیستی در پساب خروجی در حد مطلوب است و برای مصارف کشاورزی مناسب است. در پژوهش دیگری که توسط Dadrasi Sabzevar et al. (2014) انجام شد کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانهٔ سبزوار به‌منظور استفاده در بخش کشاورزی بررسی و مشخص

شد به جز میزان کلی‌فرم، سایر پارامترهای پساب خروجی در حد مطلوب و مناسب برای کشاورزی است. Nourmoradi et al. (2014) نیز در مطالعه‌ای دیگر به امکان‌سنجی استفاده از پساب خروجی تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهر ایلام که با روش لاگون هوادهی تصفیه می‌شد پرداختند. بر اساس گزارش آن‌ها، تصفیه‌خانهٔ ایلام قابلیت کاهش مناسب BOD، COD و TSS فاضلاب را بر اساس استانداردهای محیط‌زیست ندارد. هم‌چنین در پژوهشی دیگر که توسط Mehravaran et al. (2015) انجام شد به امکان‌سنجی استفاده از پساب خروجی تصفیه‌خانهٔ پرکندآباد مشهد و بررسی پارامترهائی از قبیل BOD، COD و TSS پرداخته شد. نتایج آن‌ها نشان داد پساب خروجی تصفیه‌خانه قابلیت استفاده در بخش کشاورزی را داراست. Dindarlou et al. (2018) نیز خروجی تصفیه‌خانهٔ کرمانشاه را بررسی کرده و آن را برای مصارف کشاورزی مناسب گزارش کردند.

۳-۵- بررسی روابط همبستگی پارامترها با یکدیگر

در پژوهش حاضر میزان و نوع همبستگی پارامترهای مورد مطالعه در فاضلاب ورودی و خروجی (به‌طور جداگانه) بررسی شد. نتایج حاصل از همبستگی پارامترها در فاضلاب ورودی و خروجی به‌ترتیب در جدول ۴ و ۵ ارائه شده است.

بر اساس نتایج پژوهش حاضر، همبستگی مثبت و معناداری میان پارامترهای EC با TDS و Turbidity با TSS در فاضلاب ورودی وجود داشت. Odjadjare (2010) و Okoh نیز همبستگی مثبت و معناداری بین پارامترهای EC با TDS (۰/۹۹۹) در خروجی تصفیه‌خانه‌ای در شرق لندن یافتند. نتایج تحقیق حاضر همبستگی منفی و معناداری میان غلظت NH3 با مقادیر Turbidity و TSS در فاضلاب ورودی نشان داد؛ ولی این رابطه در فاضلاب خروجی عکس شده و به همبستگی مثبت و معنادار تبدیل شد. هم‌چنین در فاضلاب خروجی میزان TP همبستگی منفی و معنی‌دار را با میزان TDS و NH3 نشان داد.

با بررسی روابط همبستگی و تعیین میزان ارتباط بین پارامترها می‌توان روابط موجود را به‌صورت یک مدل ارائه کرده و بدون نیاز به اندازه‌گیری و تحلیل مجدد نمونه‌ها در آینده و صرفا با استفاده از رابطهٔ به‌دست آمده، مقادیر هر پارامتر را پیش‌بینی نمود. لازم به‌ذکر است مدل‌سازی نیازمند داده‌های با سری زمانی بیش‌تر است که با به‌کارگیری هوش مصنوعی، مدل‌سازی با صحت و دقت بالا انجام می‌شود (Yang et al., 2022; Hejabi et al., 2021).

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با اندازه‌گیری برخی پارامترهای فیزیکی و شیمیائی، به بررسی میزان کارائی واحدهای SBR در تصفیه‌خانهٔ شهر یزد پرداخته شد که نتایج حاصل را می‌توان به سایر تصفیه‌خانه‌هائی که از این روش بهره می‌برند نیز تعمیم داد. بر اساس نتایج این پژوهش بیش‌ترین میزان کارائی این واحدها در حذف میزان Turbidity، BOD، TSS و COD است. با بررسی میزان کارائی روش SBR با روش تالاب مصنوعی و برکه‌های تثبیت مشخص شد بهترین کارائی مربوط به روش SBR است. هم‌چنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد با توجه به حد مجازهای تعیین شده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران و بر اساس شاخص جامع آلودگی محاسبه شده، فاضلاب خروجی واحدهای SBR تصفیه‌خانهٔ شهر یزد برای مصارف کشاورزی و آبیاری فضای سبز مناسب و بدون خطر است و کیفیت پساب در طبقهٔ تمیز قرار دارد، اما بر اساس حد مجاز آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا، استفاده از پساب خروجی واحدهایی SBR برای کاربری آبیاری دارای ریسک است و کیفیت پساب در طبقهٔ با آلودگی متوسط قرار دارد. هم‌چنین بر اساس شاخص ویلکاکس و میزان EC، پساب خروجی از واحدهای SBR تصفیه‌خانهٔ یزد در سطح با شوری بالا و از نظر کیفیت برای کشاورزی در طبقهٔ متوسط قرار دارد. با توجه به ویژگی‌های پساب تصفیه شده این شهر و با نظر به وجود صنایع متعدد در دشت یزد-اردکان و کمبود آب در این منطقه، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده به امکان‌سنجی استفاده از پساب تصفیه شده برای مصارف صنعتی نظیر برج‌های خنک کننده، دیگ‌های بخار، فرآیند تولید محصولات، اطفاء حریق، کنترل گرد و غبار، صنعت ساختمان‌سازی و تغذیهٔ مصنوعی آب‌های زیرزمینی نیز پرداخته شود.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از یک پروژهٔ پژوهشی بوده که به سفارش شرکت آب و فاضلاب شهری استان یزد و با حمایت مالی آن شرکت انجام شده است. بر خود لازم می‌دانیم از کلیهٔ پرسنل اداری و تصفیه‌خانهٔ این شرکت که ما را در انجام این پژوهش یاری نمودند کمال قدردانی و تشکر را نمائیم.

جدول ۴- ضرایب همبستگی میان پارامترهای فیزیکی و شیمیائی در فاضلاب ورودی

Table 4- Correlation coefficients between physical and chemical parameters in the influent

پارامترها	EC	pH	Turbidity	TDS	TSS	BOD	COD	NH3	TP
EC	1								
pH	0.415	1							
Turbidity	0.528	0.141	1						
TDS	0.966**	0.518	0.489	1					
TSS	0.569	0.231	0.922**	0.498	1				
BOD	0.328	-0.116	-0.03	0.175	0.224	1			
COD	-0.037	0.078	0.303	-0.081	0.448	0.269	1		
NH3	-0.175	0.013	-0.808**	0.166	-0.722**	-0.001	-0.485	1	
TP	0.073	0.367	-0.319	0.117	-0.231	-0.05	-0.503	0.564	1

*معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد **معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد

جدول ۵- ضرایب همبستگی میان پارامترهای فیزیکی و شیمیائی در فاضلاب خروجی

Table 5- Correlation coefficients between physical and chemical parameters in the effluent

پارامترها	EC	pH	Turbidity	TDS	TSS	BOD	COD	NH3	TP
EC	1								
pH	0.03	1							
Turbidity	0.155	0.212	1						
TDS	0.182	0.468	0.733**	1					
TSS	0.216	-0.076	0.938**	0.621*	1				
BOD	-0.041	0.157	-0.097	-0.284	-0.052	1			
COD	-0.089	-0.29	0.675*	0.409	0.798**	0	1		
NH3	0.083	0.552	0.835**	0.855**	0.697*	-0.113	0.493	1	
TP	0.343	-0.379	-0.465	-0.744**	-0.412	0.025	-0.551	-0.685*	1

*معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد **معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد

منابع

اسلامی، ه.، غلمانی، س.و.، صالحی وزیری، اکبر.، حسین‌شاهی، د.، قلعه‌عسکری، س.، طالبی همت آبادی، پ.، و معراجی‌مقدم، ط. (۱۳۹۴). مقایسه عملکرد برکه‌های تثبیت و تالاب مصنوعی با جریان زیر سطحی در تصفیه فاضلاب شهری در یزد. *آب و فاضلاب*، ۲۶(۶)، ۱۰۰-۱۰۶.

اکبری، ح.، حبیبی‌پور، ا.، پورچیت ساز، آ.، و تیموری، م. (۱۳۹۱). تالآب‌های مصنوعی فرصتی برای حفظ تنوع زیستی (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه یزد). *محیط‌زیست (ویژه‌نامه تالاب‌ها)*، ۵۴، ۵۳-۵۷.

انبیر، ل.، و نوری، ز. (۱۳۹۷). بررسی کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری اکباتان جهت کاربرد در اراضی کشاورزی و فضای سبز. *مدیریت اراضی*، ۶(۱)، ۹۵-۱۰۲.

تکدستان، ا.، مهردادی، ن.، و ترابیان، ع. (۱۳۹۰). بررسی کارایی راکتور ناپیوسته متوالی (SBR) در تصفیه فاضلاب در شرایط مختلف بهره برداری و راهبری. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۱۳(۲)، ۱-۱۱.

دادرسی سبزوار، ا.، خسروشاهی، م.، و برآبادی، ح. (۱۳۹۳). ارزیابی کارایی پساب تصفیه شدهٔ شهری در احیاء مناطق بیابانی (بررسی موردی: تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهر سبزوار). *مدیریت بیابان*، ۲(۳)، ۳۷-۴۹.

دیندارلو، ع.، و دستورانی، م. (۲۰۱۷). بررسی کارایی تصفیه فاضلاب به روش لجن فعال در تأمین کیفیت پساب برای مصارف آبیاری (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه فاضلاب کرمانشاه). *آب و توسعه پایدار*، ۴(۲)، ۳۱-۴۰.

سالاری، ف.، سرهنگ زاده، ج.، و زارع خورمیزی، م. (۱۴۰۱). نقش و اهمیت تالآب‌های مصنوعی سد کاسه‌رود ابرکوه و تصفیه‌خانه استان یزد به‌عنوان زیستگاه پرندگان مهاجر. *پژوهش‌های جانوری*، ۳۵(۱)، ۲۸-۳۴.

سبحان، س.، آیت‌اللهی، ش.، احتشامی، م.، حسین‌شاهی، د.، غلمانی، س.، صالحی وزیری، ا.، و طالبی، پ. (۱۳۹۱). بررسی کارایی گیاه لویی در تالاب مصنوعی زیرسطحی در تصفیه فاضلاب شهری یزد. *بهداشت و توسعه*، ۱(۴)، ۲۶۵-۲۷۴.

فرزداکیا، م.، احرامپوش، م.، کرمانی، م.، ندافی، ک.، و ابویی مهریزی، ا. (۱۳۹۲). بررسی راندمان و تعیین ضرایب سینتیکی حذف نوترینت‌ها در نیزار زیرسطحی تصفیه‌خانه فاضلاب شهر یزد. *سلامت و بهداشت*، ۴(۱)، ۷-۲۰.

مهرآوران، ب.، انصاری، ح.، بهشتی، ع.، و اسماعیلی، ک. (۱۳۹۴). بررسی امکان استفاده از پساب تصفیه شده در آبیاری با توجه به اثرات زیست محیطی آن (مطالعه موردی پساب خروجی تصفیه‌خانه پرکندآباد مشهد). *آبیاری و زهکشی ایران*، ۹(۳)، ۴۴۰-۴۴۷.

نورمرادی، ح.، کریمی، ح.، علی حسینی، ا.، باقی، ا.، و فرخی مقدم، ک. (۱۳۹۳). ارزیابی عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ایلام در حذف کل کلی فرم، کلی‌فرم مدفوعی و سایر عوامل موثر بر کیفیت آب. *دانشگاه علوم پزشکی ایلام*، ۲۲(۱)، ۷۷-۸۳.

واثقی، ا.، زارع مهرجردی، م.، نیکویی، ع.، و مهرابی بشر آبادی، ح. (۱۴۰۰). ارزیابی ریسک مصرف‌های پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه شمال شهر اصفهان). *علوم محیطی*، ۱۹(۲)، ۵۷-۷۰.

References

Akbari, H., Habibipour, A., Pourchitsaz, A., & Teimouri, M. (2014). Artificial wetlands, an opportunity for conservation of biodiversity (Case study: wastewater treatment plant of Yazd city). *Environmental Science and Engineering*, 54, 53-57 (in Persian).

Alihosseini, S.H., Torabian, A., & Semiromi, F.B. (2020). Evaluation of treated municipal wastewater effluent for agricultural irrigation purposes using the fuzzy effluent quality index (FEQI). *Water Supply*, 20(1), 148-156.

Anbir, L., & Noori, Z. (2018) Investigation of Effluent Quality of Ekbatan Wastewater Treatment Plant for Farm and Green Space Irrigation. *Land Management*, 6(1), 95-102 (in Persian).

APHA, (1999). Standard methods for the examination of waste water. 20th Edn. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. http://dx.doi.org/10.2105/AJPH.51.6.940-a.

Dadrasi Sabzevar, A., Khosroshahi, M., & Barabadi, H. (2014). Feasibility Assessment of use of refined urban Wastewater for Reclamation of Arid Lands (Case study: The urban wastewater treatment plant of Sabzevar). *Desert Management*, 2(3), 37-49 (in Persian).

Dindarlou, A., & Dastourani, M. (2018). Investigation of the efficiency of sewage treatment using activated sludge method to supply water for reuse in agricultural irrigation (Case study: Kermanshah Sewage Treatment Plant). *Water and Sustainable Development*, 4(2), 31-40 (in Persian).

Eslami, H., Ghelmani, S.V., Salehi Vaziri, A., Hosseinshahi, D., Ghaleaskari, S., Talebi Hemmatabadi, P., & Merajimoghadam, T. (2015). Comparing the efficiency of stabilization ponds and subsurface constructed wetland in domestic sewage treatment in City of Yazd. *Water & Wastewater*, 26(6), 100-106 (in Persian).

Eslami, H., Hematabadi, P.T., Ghelmani, S.V., Vaziri, A.S., & Derakhshan, Z. (2015) The performance of advanced sequencing batch reactor in wastewater treatment plant to remove organic materials and linear alkyl benzene sulfonates. *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 7(3), 33-39.

Farzadkia, M., Ehrampoush, M.H., Sadeghi, S., Kermani, M., Ghaneian, M.T., Ghelmani, V., & Abouee Mehrizi, E. (2014). Performance evaluation of wastewater stabilization ponds in Yazd-Iran. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 1(1), 7-12.

Farzadkia, M., Ehrampoush, M., Nadafi, K., Kermani, M., & Abouee Mehrizi, E. (2013). Investigating efficiency and kinetic cofficients of the nutrient's removal in the subsurface artificial wetland of Yazd's wastewater treatment plant. *Health and Hygiene*, 4(1), 7-20 (in Persian).

Hejabi, N., Saghebian, S. M., Aalami, M. T., & Nourani, V. (2021). Evaluation of the effluent quality parameters of wastewater treatment plant based on uncertainty analysis and post-processing approaches (case study). *Water Science and Technology*, 83(7), 1633-1648.

Mehravaran, B., Ansary, H., Beheshti, A., & Esmaili, K. (2015). Investigate the feasibility of using wastewater purication in irrigation due to its environmental impacts (The effluent treatment plants parkandabad Mashhad). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 9(3), 440-447 (in Persian).

Miri, M., Jamshidi, S., Derakhshan, Z., Gholizadeh, A., Karimi, H., Amanalikhani, S., & Hashemi, S.Y. (2016). Spatial analysis and source identification of particulate matter (PM10) in Yazd city. *Journal of Community Health Research*, 5(1), 45-56.

Nourmoradi, H., Karimi, H., Alihosseini, Baghi, A., & Farokhimoghadam, K. (2014). Survey on the performance of Ilam wastewater treatment plant in the removal of coliform, fecal coliforms and other parameters effected on water quality, Ilam University of Medical Science, 22(1), 77-83 (in Persian).

Odjadjare, E.E.O., & Okoh, A.I. (2010). Physicochemical quality of an urban municipal wastewater effluent and its impact on the receiving environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 170, 383–394.

Reed, S., Parten, S., Matzen, G., & Pohrent, R. (1996). Water reuse for sludge management and wetland habitat. *Water Science and Technology*, 33(10-11), 213-9.

Sadeghi, A., Larimian, T., & Molabashi, A. (2012). Evaluation of renewable energy sources for generating electricity in province of Yazd: a fuzzy MCDM approach. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 62, 1095-1099.

Salari, F.S., Sarhangzadeh, J., & Zare Khourmizi, M. (2022). The role and importanc of the artificial lagoon of Yazd refinery and Kasehrood Abarkooh dam as a habitat for migratory birds. *Animal Research (Iranian Journal of Biology)*, 35(1), 28-43 (in Persian).

Sanaei, A., Azimi, A.A., Mehrdadi, N., & Reeisi, H. (2009). Combination of improved anaerobic pond and constructed subsurface wetland for domestic wastewater treatment. Proceedings of the 1st Conference of Wetland in Kermanshah, Kermanshah, Iran.

Shahraki, S.Z., Sauri, D., Serra, P., Modugno, S., Seifolddini, F., & Pourahmad, A. (2011). Urban sprawl pattern and land-use change detection in Yazd, Iran. *Habitat International*, 35(4), 521-528.

Shakir, E., Zahraw, Z., & Al-Obaidy, A.H. (2017). Environmental and health risks associated with reuse of wastewater for irrigation. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(1), 95-102.

Shutes, R.B.E. (2001). Artificial wetlands and water quality improvement. *Environment International*, 26(5-6), 441-447.

Sobhan, S., AyatollahiI, S., Ehteshami, M., Hosseinshahi, D., Ghelmani, S., Salehi Vaziri, A., & Talebi, P. (2013). The efficiency of Typha Latifolica in subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment. *Health and Development*, 1(4), 265-274 (in Persian).

Spellman, F.R., & Drinan, J. (2014). *Wastewater stabilization ponds*. Boca Raton: CRC Press.

Takdastan, A., Mehrdadi, N., & Torabian, A. (2011). An investigation on the efficiency of SBR in different operation conditions. *Environmental Science and Technology*, 13(2), 1-11 (in Persian).

Tsalkatidou, M., Gratziou, M., & Kotsovinos, N. (2009). Combined stabilization ponds-constructed wetland system. *Desalination*, 248(1-3), 988-997.

USEPA, (2004). Guidelines for water reuse. Washington, DC, 450.

Vaseghi, E., Zare Mehrjerdi, M., Nikouei, A., & Mehrabi Boshrabadi, H. (2021). Risk assessment of using output effluent of urban wastewater treatment plants (Case study: Northern Isfahan wastewater treatment plant). *Environmental Sciences*, 19(2), 57-70 (in Persian).

Wilcox, L. (1955). *Classification and use of irrigation waters (No. 969)*. US Department of Agriculture.

Yang, Y., Kim, K.R., Kou, R., Li, Y., Fu, J., Zhao, L., & Liu, H. (2022). Prediction of effluent quality in a wastewater treatment plant by dynamic neural network modeling. *Process Safety and Environmental Protection*, 158, 515-524.

You, Z.J., Lu, J.X., & Liu, Y.Y. (2009). The improvement of calculation formula of comprehensive pollution index. *Environmental Science*, 21, 101-102.