



Research Paper

Treatment of Industrial Wastewater Using an Integrated Anaerobic Reactor and Fixed-Film Activated Sludge (IFAS) System

Abdoulah Samiee Bayragh¹, Mohammad Meshkini¹ and Mehdi Zakeri Khatir^{2*}

¹Lecturer, Mineral Processing Research Institute, Tehran, Iran

²Assist. Professor, Mineral Processing Research Institute, Tehran, Iran

Article information

Received: October 16, 2023

Revised: December 19, 2023

Accepted: December 21, 2023

Keywords:

Effluent

IFAS System

Industrial Water

Reuse

Treated Wastewater

*Corresponding author:

m.zakeri@acecr.ac.ir



Abstract

Wastewater reuse has become a common practice in many industries to manage water resources effectively. The objective of this research was to investigate the possibility of reusing treated wastewater from the Urmieh 2 industrial state an integrated approach combining industrial and agricultural water harvesting. In this study, a pilot-scale IFAS system was used for wastewater treatment, which included an anaerobic reactor. The effective parameters evaluated included efficiency in removing COD, BOD, TSS, pH and HRT. The adaptation of microorganisms in biofilm formation to reach a stable state in the IFAS occurred within a maximum of 35 days. After this period, no noticeable change in COD removal efficiency was observed. The optimal HRT for anaerobic reactor was 1 day with 4 hr of aerobic activity. The highest removal efficiencies of COD, BOD and TSS, respectively, were observed with HRTs of 2 days anaerobic and 8 hr aerobic 88.71%, 3 days anaerobic and 8 hr aerobic 92.11%, and 2 days anaerobic and 8 hr aerobic 97.90%. According to the Wilcox classification, the effluents from the process are categorized as medium-quality waters and are suitable for irrigation purposes. The output pH values indicate that the treated wastewater can also be used in agricultural applications.

How to cite this paper: Samiee Bayragh, A., Meshkini, M., & Zakeri Khatir, M. (2024). Treatment of industrial wastewater by anaerobic reactor and integrated fixed-film activated sludge (IFAS) method. *Environ. Water Eng.*, 10(3), 317-330. <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.420979.1896> (In Persian)



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The reuse of wastewater in industries and agriculture has become common in many countries around the world, including America, Canada, France, Germany, Mexico, Brazil, Egypt, China, Morocco, and Saudi Arabia. Combined with Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS), suspended and attached biomasses have been effectively used simultaneously. The design criteria in the IFAS system include primary treatment, mixing, hydraulic profile and volume settings, effective microbial mass levels, bed placement conditions, oxygen transfer, equipment evaluation, media mobility, and economic considerations. IFAS systems are used in urban and industrial wastewater treatment. Combined suspended and attached growth systems are effective in removing phosphorus and nitrogen as advanced wastewater processes. They offer simple management, easy design, no growth and development of annoying insects, less sensitivity to temperature changes, high efficiency in removing organic matter, a lower volume of produced sludge, reduced time, energy consumption, and treatment cost, and a high ability to absorb heavy metals and pollutants. Biological improvement of purifying water is one of the advantages of this method. The purpose of this research was to investigate the possibility of reusing the treated wastewater of Urmia 2 industrial estates with the integrated method of anaerobic reactor system and IFAS.

Material and Methods

To initiate the reactors, seeding was performed using sludge prepared from the return flow of the aeration pond at the human sewage treatment plant. The IFAS reactor was filled to 70% capacity with packing media. The IFAS reactor was aerated for 25 days to allow for the growth of a suitable biofilm on the packing media. After transferring the activated sludge to the IFAS reactor, the system was operated continuously for 3 weeks. To initiate the anaerobic reactor, a wastewater sample was prepared from the pond before the balancing unit. Synthetic wastewater, along with return sludge, was continuously used to feed the system.

Results

In IFAS systems, the lowest and highest removal efficiencies are related to the hydraulic retention times (HRT) of 1 day anaerobic and 4 hr aerobic (42.74%) and 2 days anaerobic and 8 hr aerobic (71.88%), respectively. Comparing the results (Fig. 1) reveals that the use of IFAS is associated with an increase in COD removal efficiency. In general, within the whole system (comprising the anaerobic reactor and IFAS), the lowest and highest BOD removal efficiencies are related to the HRT of 2 days anaerobic and 4 hr aerobic, and 3 days anaerobic and 8 hr aerobic, respectively. Reducing the HRT did not have a significant effect on the BOD removal efficiency by anaerobic reactors, IFAS, and the whole system (Fig. 1).

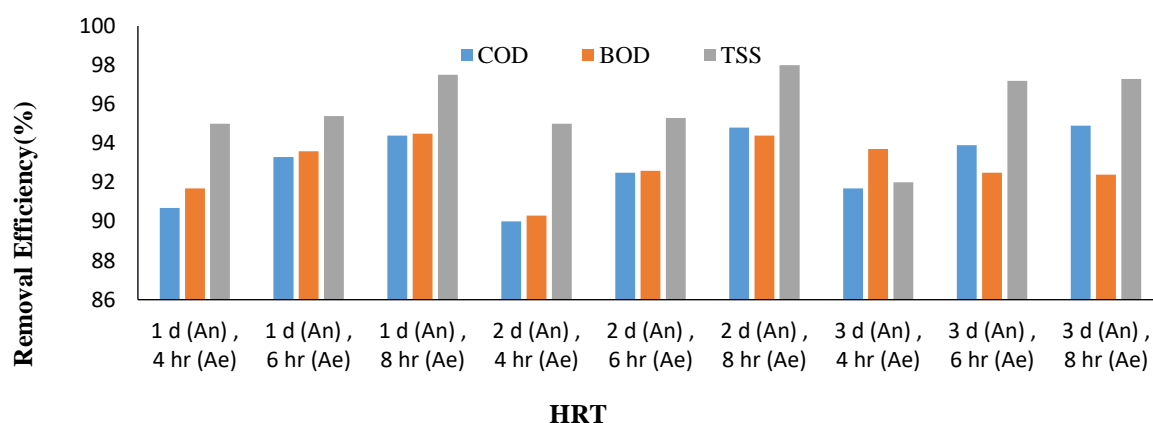


Fig. 1 The efficiency of the entire biological treatment system in removing COD, BOD and TSS from industrial wastewater at different HRT

According to the diagram in Fig. 1, the highest and lowest TSS removal rates in HRT are 2 days anaerobic and 8 hr aerobic (97.9%) and 3 days

anaerobic and 4 hr aerobic (91.8%), respectively. Due to the low concentration of TSS in the effluent, there is no need to increase the HRT for

this specific configuration (1 day anaerobic and 4 hr aerobic). The results of TSS analysis indicate

that this type of wastewater is suitable for all types of irrigation systems.

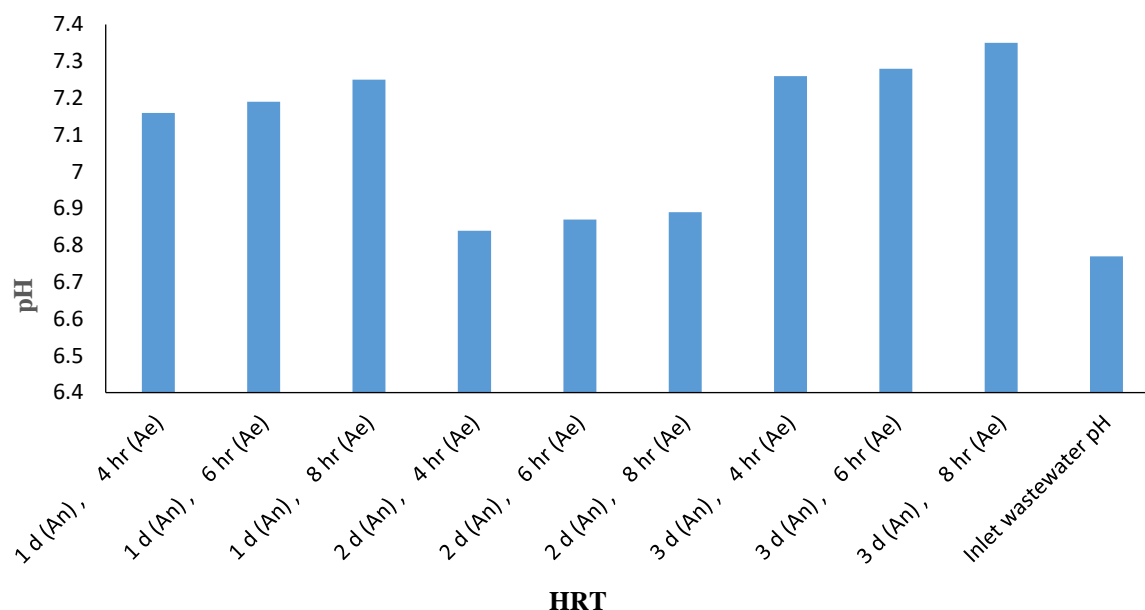


Fig. 2 Comparison graph of pH changes of phase 2 effluent from the IFAS reactor at different HRT and operating conditions

According to the graph in Fig. 2, the pH of the effluent increased with increasing HRT. As COD removal efficiency increased, the outlet pH values also increased. The results of phase 2 wastewater analysis showed that the pH of this wastewater is typically around 7, which is slightly acidic, and it may require pH balancing. Based on the pH results, this wastewater can be used for agricultural purposes.

Based on the mentioned definitions and the results obtained from the biological treatment of phase 2 effluent, it can be inferred that the phase 2 effluent falls under groups B and C. According to the Wilcox classification method, the output effluent of phase 2 belongs to the category of medium-quality waters and is suitable for irrigation purposes.

Conclusions

The removal efficiencies of COD, BOD, and TSS from the industrial wastewater of Urmia Phase 2 industrial state were optimal during the periods of

2 days anaerobic and 8 hr aerobic, 3 days anaerobic and 6 hr aerobic, and 3 days anaerobic and 8 hr aerobic. The highest removal efficiencies of COD, BOD, and TSS in the wastewater treatment system, respectively, were observed with HRT of 2 days anaerobic and 8 hr aerobic (88.71%), 3 days anaerobic and 8 hr aerobic (92.11%), and 2 days anaerobic and 8 hr aerobic (97.90%).

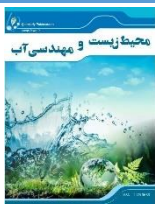
According to the Wilcox classification method, the output effluents of phase 2 belong to the category of medium-quality.

Data Availability

The data used or generated in this research are presented in the text of the article.

Conflicts of interest

The authors of this paper declare no conflict of interest regarding authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

تصفیه پساب صنعتی با روش تلفیقی سیستم راکتور بی‌هوازی و لجن فعال با رشد چسبیده (IFAS)

عبداله سمیعی بیرق^۱، محمد مشکینی^۱ و مهدی ذاکری خطیر^{۲*}

^۱ مربی، پژوهشکده فراوری مواد معدنی، جهاد دانشگاهی، تهران، ایران
^۲ استادیار، پژوهشکده فراوری مواد معدنی، جهاد دانشگاهی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۷/۲۴]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۹/۲۸]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۹/۳۰]

واژه‌های کلیدی:

استفاده مجدد

پساب

فاضلاب تصفیه‌شده

آب صنعتی

سیستم IFAS

*نویسنده مسئول:

m.zakeri@acecr.ac.ir

استفاده مجدد از پساب در بسیاری از صنایع و کشاورزی به‌منظور مدیریت منابع آبی رایج شده است. هدف از این پژوهش بررسی امکان استفاده مجدد پساب تصفیه‌شده با رویکرد استحصال آب صنعتی و کشاورزی است که از روش تلفیقی راکتور بی‌هوازی و IFAS در مقیاس پایلوت برای تصفیه پساب استفاده شد. متغیرهای مؤثر شامل کارایی سامانه در حذف COD، BOD و TSS، تغییرات pH و زمان‌های ماند هستند. سازگاری میکروارگانیسم‌ها در تشکیل بیوفیلم برای رسیدن به حالت پایدار در سیستم IFAS حداکثر در ۳۵ day اتفاق افتاد. بعدازآن تغییر محسوسی در بازدهی حذف COD مشاهده نشد. HRT بهینه یک day بی‌هوازی ۴ hr هوازی بود. بیشینه بازدهی حذف COD با ۲ day بی‌هوازی ۸ hr هوازی ۸۸/۷۱٪ BOD با ۳ day بی‌هوازی ۸ hr هوازی ۹۲/۱۱٪ و TSS با ۲ day بی‌هوازی ۸ hr هوازی ۹۷/۹۰٪ در سیستم مشاهده شد. بر اساس روش ویلکاکس پساب خروجی جزء آب‌های متوسط بوده و برای آبیاری مناسب است. pH پساب خروجی نشان از قابلیت کاربرد کشاورزی آن دارد. بر اساس نتایج حاصله، پساب تصفیه‌شده با کیفیت متوسط قابلیت استفاده در کشاورزی، صنعتی و آبیاری را داشته و با کیفیت ضعیف در خنک‌کننده‌ها می‌توان از آن استفاده کرد.

نحوه استناد به این مقاله:

سمیعی بیرق، عبداله، مشکینی، محمد، & ذاکری خطیر، مهدی. (۱۴۰۳). تصفیه پساب صنعتی به‌وسیله روش تلفیقی سیستم راکتور بی‌هوازی و لجن فعال با رشد چسبیده (IFAS) به‌منظور استفاده در مصارف مختلف صنعتی و کشاورزی. محیط زیست و مهندسی آب. 317-330 (3)10 <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.420979.1896>



۱- مقدمه

وجود مواد آلاینده در فاضلاب و ورود آن به سیستم تغذیه موجودات زنده و انسان‌ها اثرات خطرناکی بر سلامتی آن‌ها خواهد گذاشت. کاربرد و استفاده مجدد پساب در صنایع و کشاورزی در بسیاری از کشورهای جهان از جمله آمریکا، کانادا، فرانسه، آلمان، مکزیک، برزیل، مصر، چین، مراکش و عربستان رایج شده است (Daee et al. 2016). متداول‌ترین روش‌ها برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی فرایندهای هوازی، بی‌هوازی و زیست‌شناختی ترکیبی (هوازی، بی‌هوازی و آنوکسیک) هستند. سیستم‌های ترکیبی رشد معلق و چسبیده، اخیراً مورد توجه بوده است و به‌عنوان فرایندهای پیشرفته فاضلاب در حذف فسفر و نیتروژن مؤثر هستند (Deng et al. 2016). سیستم‌های تلفیقی لجن فعال با رشد چسبیده (IFAS)^۱ در تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی بکار گرفته می‌شوند. این عمل برای ارتقا دادن تصفیه‌خانه‌های لجن فعال موجود و نیترات‌سازی و نیترات‌زدایی در آن‌ها به کار رود (Trojanowicz 2021; Malovanyy et al. 2015). روش تلفیقی لجن فعال با رشد چسبیده و سیستم راکتور بی‌هوازی عملکرد بهتر و مناسبی برای ارتقای فاضلاب تصفیه‌خانه‌های موجود دارد (Chalampol et al. 2022a, Shakeri, 2021b). این سیستم با استفاده از مدیا یا بستر ثابت طراحی شده و نیازی به ساخت واحدهای دیگر ندارد. HRT^۲، عاملی مهمی در تعیین عملکرد تصفیه فاضلاب است. با افزایش نادرست HRT هزینه تجهیزات افزایش و کارایی سیستم کاهش می‌یابد. با کاهش بیش‌از حد HRT غلظت ترکیبات آلی در خروجی افزایش می‌یابد. در صورتی که میزان ترکیبات آلی و غلظت ترکیبات فسفر بیشتر باشد؛ فرایند به یک تصفیه بی‌هوازی (پیش از تصفیه فاضلاب با راکتور هوازی) نیاز دارد (Falahati 2016).

راهبری ساده، طراحی آسان، عدم رشد و نمو حشرات مزاحم، حساسیت کمتر در مقابل تغییرات دما، بازدهی بالا در حذف مواد آلی، کمتر بودن حجم لجن تولیدی، کاهش زمان، مصرف انرژی و هزینه تصفیه، توانایی بالا در جذب فلزات سنگین و

آلاینده‌های زیستی و بهبود کیفیت آب تصفیه‌شده از مزایای این روش است (Shiva Kumar et al. 2014).

در سال ۱۳۸۰ عملکرد فرایند IFAS در تصفیه فاضلاب صنایع غذایی توسط محققان بررسی شده است. بازدهی حذف این فاضلاب در حدود ۹۸٪ تا ۹۹٪ گزارش شد (Azimi 2010; Mustafaei 2006). در تحقیقی دیگر توانایی سیستم‌های بیوفیلمی برای تصفیه فاضلاب خروجی کارخانه‌های چوب و کاغذ با بازدهی ۶۶٪ برای COD و ۸۷٪ برای BOD گزارش شده است (Liu et al. 2021). در یک راکتور راه‌اندازی شده برای تصفیه فاضلاب خروجی از کشتارگاه در مقیاس صنعتی با سیستم IFAS، بازدهی ۹۵٪ و میزان حذف BOD و COD به ترتیب ۶۰٪ و ۸۸٪ بوده است (Selvabharathi 2022). در مطالعه انجام‌شده‌ای در ارتباط با مقایسه روش IFAS و MBBR نتایج حاصله حاکی از بازدهی ۱/۵ برابری سیستم IFAS در حذف ترکیب ازت بود. در هر دو سیستم نسبت COD/N معادل ۱/۸ بود (Malovanyy et al. 2015). استفاده از دو راکتور IFAS در شرایط با و بدون پیش‌تصفیه شیمیایی مقایسه شده‌اند. ماده اکسند از ن با دوز تزریقی ۳۰ mg/l انتخاب شد. در شرایط پیش‌تصفیه شیمیایی میزان تجزیه‌پذیری حدود ۴۵٪ افزایش یافت (Shabir et al. 2013). در یک پژوهش، از سیستم تلفیقی هاضم بی‌هوازی و سیستم بیوفیلمی با برگشت لجن (IFAS) برای حذف رنگ از پساب مصنوعی استفاده شده است. بیشترین بازدهی حذف رنگ و COD در هاضم بی‌هوازی در HRT برابر با ۲/۵ day، دمای ۳۵ °C و ۵۰ درصد پرشدگی به ترتیب ۸۱٪ و ۹۹٪ بود. بیشترین بازدهی حذف رنگ و COD در IFAS در HRT برابر با ۶ hr و پرشدگی ۷۰٪ به ترتیب ۲۵٪ و ۱۰۰٪ بود (Kube et al. 2022). (Jabari et al. 2014). al به بررسی میزان نیتریفیکاسیون و میزان جذب فسفات بر روی فیلم ثابت سیستم IFAS پرداختند. نتایج نهایی تحقیق بیانگر ارتباط مستقیم عملکرد سیستم با دوز اکسیژن بهینه ۲ mg/l بود. (Santos et al. 2020). نشان دادند که راکتورهای بیوفیلمی IFAS برای بررسی میزان حذف

¹Integrated Fixed Bed Activated Sludge

²Hydraulic Retention Time

سیستم راکتور بی‌هوازی و IFAS در فرآیند تصفیه مورد استفاده قرار گرفت.

در این پژوهش از آنجاکه فرایند IFAS با تلفیقی از سیستم‌های هوازی و بی‌هوازی بوده و موارد مشابه آن در دسترس نبود می‌تواند از مهم‌ترین دلایل نوآوری بودن آن باشد. خلأهای مطالعاتی در خصوص این طرح در مقیاس‌های صنعتی کیفیت و نوع آلاینده‌ها هستند. هدف از این پژوهش بررسی امکان استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده شهرک‌های صنعتی ارومیه ۲ با رویکرد استحصال آب صنعتی از پساب با روش تلفیقی سیستم راکتور بی‌هوازی و IFAS است.

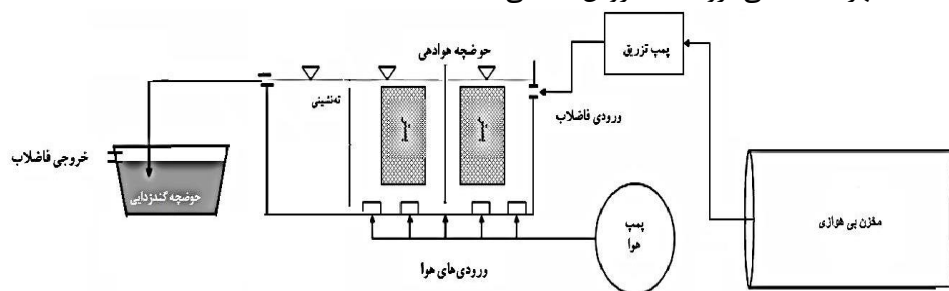
۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- مواد

تجهیزات مورد استفاده شامل پایلوت راکتور بی‌هوازی از جنس پلی‌اتیلن، راکتور سیستم IFAS، راکتور هوازی همراه با واحد ته‌نشینی از جنس پلکسی‌گلس با ضخامت ۸ mm، پکینگ لانه‌زنبوری گام ۱F-۱۹، پمپ آکوا HC 1، هواده آکواریومی با ظرفیت ۴۵ l/min هوای فشرده، دستگاه‌های COD، BOD و TSS سنج و pH متر و مخزن فاضلاب و تجهیزات آزمایشگاهی هستند.

۲-۲- روش‌ها

شکل (۱) تصویر پایلوت مورد استفاده در تصفیه فاضلاب تصفیه‌خانه شهرک صنعتی ارومیه ۲ را نشان می‌دهد (Kube et al. 2022). مشخصات راکتور موردنظر در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویر پایلوت مورد استفاده در تصفیه فاضلاب تصفیه‌خانه شهرک صنعتی ارومیه ۲

Fig. 1 The image of the pilot used in the wastewater treatment of industrial wastewater of phase 2

¹Wilcox

جدول ۱- مشخصات و اطلاعات فنی مربوط به راکتورهای مورد استفاده

Table 1 Specifications and technical information related to the used reactors

Parameter	Anaerobic reactor	Aerobic reactor	Settling Pond
Geometric shape	Cylindrical	Rectangular cube	Rectangular cube
useful volume (l)	200	40	40
Inlet flow rate (l/hr)	0.55-1.6	5, 6.6, 10	5, 6.6, 10
stream direction	Horizontal	First downward, then upward	Horizontal
HRT (hr)	24-72	4, 6, 8	2, 3, 4

راکتورها به منظور عمل بذر دهی با لجنی (تهیه شده از جریان برگشتی حوض هوادهی تصفیه خانه فاضلاب) با مشخصات $MLSS = 7500 \text{ mg/l}$, $pH = 7.4$ و $MLVSS = 4600$ پر شدند. راکتور IFAS توسط پکینگ مدیا به میزان ۷۰٪ پر گردید. هوادهی راکتور IFAS به مدت ۲۵ day انجام گرفت (جدول ۲).

۲. سوبستره از طریق فاضلاب سنتتیک تأمین گردید (Kube et al. 2022, Sharjeel 2020). بعد از اتمام این دوره از هوادهی، فاضلاب سنتتیک با مشخصاتی مشابه فاضلاب صنعتی مورد مطالعه ($pH = 6.77$, $TSS = 207 \text{ mg/l}$, $BOD = 333$ و $COD = 580 \text{ mg/l}$) به سیستم تزریق گردید.

جدول ۲- مشخصات پکینگ لانه زنبوری گام ۱F-۱۹

Table 2 Specification of honeycomb packing step F19-1

Type of Characteristic	Material	Special Surface (m ² /m ³)	Air Passage (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)	Temperature (°C)	Color
Type and Amount	PVC	~145	19	-2400 1200	-600 300	-600 300	60	black

بعد از بذریابی راکتور IFAS، اقدام به تزریق فاضلاب سنتتیک شد. نمونه فاضلاب اصلی از حوض قبل از واحد بی‌هوازی تهیه گردید. ترکیب شیمیایی فاضلاب مصنوعی و مشخصات آن در جدول (۳) ارائه شده است به دلیل بالا بودن بار آلی فاضلاب اقدام به طراحی و نصب راکتور بی‌هوازی شد. در طول راه اندازی راکتور بی‌هوازی HRT با تنظیم دبی روی ۵ day ثابت نگه داشته شد. فاضلاب سنتتیک به همراه لجن برگشتی برای تغذیه سیستم به طور پیوسته مورد استفاده قرار گرفت. زمان تخلیه لجن مازاد در مخزن هوادهی ۲۱ day بوده

است. برای ایجاد شرایط بهینه رشد میکروارگانیسم‌ها نسبت COD/N/P در هاضم بی‌هوازی به میزان ۵:۱:۳۰۰ تنظیم گردید. فسفر مورد نیاز با کتری‌ها از انحلال ترکیب پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات و نیتروژن مورد نیاز از آمونیوم کلرید (جدول ۳) تأمین شد (Sharjeel 2020, Kube et al. 2022).

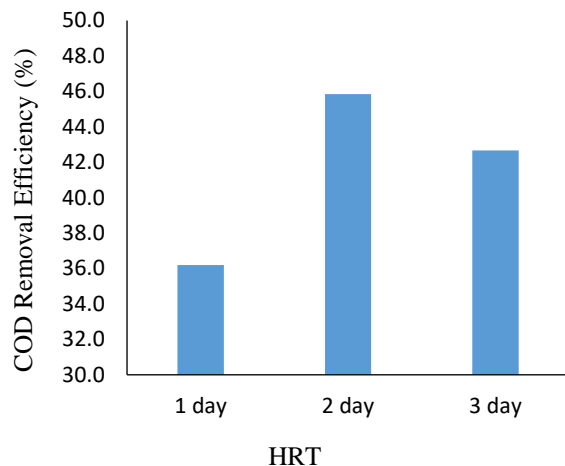
شکل (۲) نمای کلی پایلوت و نمایی از حوض هوادهی، حوض ته‌نشینی و پکینگ لانه زنبوری گام F19-1 را نشان می‌دهد (Sharjeel 2020; Kube et al. 2022).

جدول ۳- ترکیب فاضلاب ساختگی مورد استفاده برای غلظت COD ۱۰۰۰ mg/l ورودی

Table 3 The composition of simulated wastewater used for the concentration of 1000 (mg/liter) input COD

Combination Type	Na ₂ CO ₃	KH ₂ PO ₄	NH ₃ Cl	Glucose	Starch
Amount (mg/l)	1.6	12.2	56	952	1.2
Parameter	Temperature (°C)	pH	Phosphorus (mg/l)	Ammonia (mg/l)	COD (mg/l)
Amount	18	7.3	4.5	22.5	450

حداکثر میزان حذف COD در هاضم بی‌هوازی ۴۵/۸۵٪ در HRT ۲ day به دست آمد. در شرایطی که فاز بی‌هوازی قدرت حذف کمتری داشته باشد، فاز هوا دهی باید این ضعف را جبران کرده و درصد بیشتری را حذف کند. دلیل این امر این است که وقتی در فاز بی‌هوازی مقدار کمی از اکسیژن شیمیایی محلول حذف می‌شود، (Kube et al. 2022).



شکل ۳ - نمودار کارایی راکتور بی‌هوازی در حذف COD از فاضلاب صنعتی فاز ۲ در HRT های مختلف

Fig. 3 Diagram of anaerobic reactor efficiency in removing COD from industrial wastewater of phase 2 at different HRTs

با توجه به اینکه در شهرک صنعتی، واحدهای پالایشگاهی موجود نبوده و آلاینده‌هایی مانند بنزن، تولوئن، متانول و اتانول وجود ندارد، بنابراین احتمال وجود این ترکیبات سمی کمتر است.

۳-۲- تأثیر HRT مختلف IFAS بر حذف COD از فاضلاب صنعتی فاز ۲

در نمودار شکل (۴) کارایی کل سیستم تصفیه زیست‌شناختی (راکتور بی‌هوازی و IFAS) در حذف COD، BOD و TSS از فاضلاب صنعتی فاز ۲ در زمان‌ماندهای مختلف نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در زمان‌ماندهای پایین (۱ day) بازدهی حذف COD کاهش و در نتیجه غلظت خروجی آن از IFAS افزایش یافته است. به‌طور کلی در IFAS کمترین و بیشترین بازدهی حذف مربوط به زمان‌ماند ۱ day و ۴ hr هوازی (۷۴/۴۲٪) و ۲ day بی‌هوازی ۸ hr هوازی (۸۸/۷۱٪) بود. در کمترین HRT (۲۴ hr) بی‌هوازی و ۴ hr هوازی (راکتور بی‌هوازی، IFAS و کل سیستم به ترتیب



شکل ۲ - نمایی از حوض هوا دهی و حوض ته‌نشینی

Fig. 2 A view of the aeration pond and sedimentation pond

شوری با معیار هدایت الکتریکی و سدیم با یکی از معیارهای نسبی جذبی سدیم (SAR) یا درصد سدیم محلول (SSP) یا درصد سدیم قابل قبول (ESP) سنجیده می‌شود که با داشتن غلظت عناصر در آب مقادیر آن‌ها از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌شود (Jalili 2017).

$$SAR = Na / \sqrt{(Ca + Mg) \times 0.5} \quad (1)$$

$$SSP = \frac{Ma}{Ca + Mg + Na} \times 100 \quad (2)$$

کلیه مقادیر کاتیون‌ها در رابطه‌های فوق بر حسب meq/l هستند.

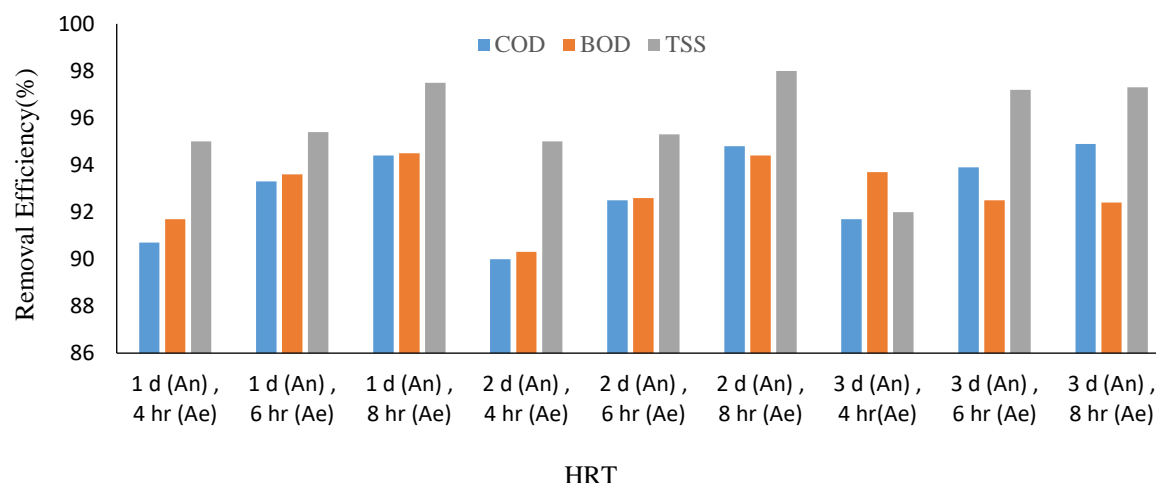
۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- تأثیر HRT بر حذف COD

در این مرحله تأثیر HRT مختلف بر بازدهی راکتور بی‌هوازی در حذف COD بررسی گردید. نمودار شکل (۳) کارایی راکتور بی‌هوازی در حذف COD از فاضلاب صنعتی فاز ۲ در HRT های مختلف نشان می‌دهد. در HRT از ۲ day به ۳ day بازدهی حذف COD افزایش پیدا نکرد (علی‌رغم انتظار با افزایش HRT) و غلظت خروجی آن از هاضم بی‌هوازی افزایش یافت. به دلیل اختلاف ناچیز در بازدهی حذف ۳ زمان‌ماند موردنظر می‌توان نتیجه گرفت HRT ۱ day یا کمتر می‌تواند در راهبری سیستم در مقیاس واقعی مورد استفاده قرار گیرد.

یافت. زیاد بودن اکسیژن محلول باقیمانده، شرایط بهتری را از نظر غذایی برای میکروارگانیسم‌های فاز بعدی آماده می‌کند که با افزوده شدن IFAS شرایط برای حذف بیشتر COD فراهم می‌شود. با افزایش بار آلی ورودی، کاهش COD متناسب با کاهش اکسیژن خواهی بیوشیمیایی خواهد بود (Azimi et al. 2007).

۳۶/۲۰، ۷۴/۴۲ و ۹۰/۷۸٪ از COD را حذف کردند. نتایج نشان‌دهنده آن بود که استفاده از IFAS با افزایش بازدهی حذف COD همراه است. از آنجا که غلظت اکسیژن و همچنین سرعت هوا و در نتیجه شرایط هیدرودینامیکی در راکتور، توسط منبع هوا کنترل می‌شد. با افزایش میزان هوای ورودی، غلظت اکسیژن و سرعت هوا در راکتور افزایش و میزان COD کاهش



شکل ۴ - نمودار کارایی سیستم راکتور بی‌هوازی و IFAS در حذف COD، BOD و TSS از فاضلاب صنعتی فاز ۲ در HRTهای مختلف

Fig. 4 Anaerobic reactor and IFAS efficiency in removing COD, BOD, and TSS from phase 2 industrial wastewater at different HRTs

توانایی مناسبی برای حذف BOD را دارا است و نیازی به افزایش HRT نیست (Kiranmai et al. 2005).

در یک مطالعه‌ای که توسط Monazami et al. (2008) انجام شده کمترین و بیشترین راندمان حذف BOD به ترتیب ۱ day بی‌هوازی و ۴ hr هوازی و ۲ day بی‌هوازی و ۸ hr هوازی ۹۳/۶٪ و ۹۸/۲٪ مربوط به HRT است در حالی که در این تحقیق در ۲ day بی‌هوازی و ۸ hr هوازی راندمان حذف ۹۵٪ به دست آمد که نشان از نزدیک به هم بودن نتایج است و علاوه بر آن چون در این ترکیبات فاضلاب مواد BOD دیر و سخت تجزیه‌پذیر وجود نداشت لذا درصد حذف در میزان قابل قبولی مشاهده شد.

۳-۴- اثر کارایی سیستم بی‌هوازی و IFAS در حذف TSS از فاضلاب صنعتی فاز ۲
طبق نتایج جدول (۳) بیشترین میزان حذف TSS در HRT ۲ day بی‌هوازی ۸ hr هوازی رخ داده است.

۳-۳- اثر کارایی راکتور بی‌هوازی و سیستم IFAS در حذف BOD

با کاهش HRT (از ۳ day بی‌هوازی ۸ hr هوازی به ۱ day بی‌هوازی ۴ hr هوازی) نیز کاهش یافته و در نتیجه غلظت BOD خروجی از سیستم افزایش پیدا کرد (نمودار شکل ۴). دلیل بالا بودن بازدهی حذف BOD (در HRT ۲ day بی‌هوازی ۴ hr هوازی نسبت به ۱ day بی‌هوازی ۴ hr هوازی) ورود کمترش به سیستم و راحت بودن حذف آن است. به‌طور کلی در کل سیستم (راکتور بی‌هوازی و IFAS) کمترین و بیشترین بازدهی حذف BOD به ترتیب مربوط به HRT ۲ day بی‌هوازی ۴ hr هوازی و ۳ day بی‌هوازی ۸ hr هوازی است. کاهش HRT تأثیر فراوانی بر بازدهی حذف BOD توسط راکتورهای بی‌هوازی، IFAS و کل سیستم نداشت. دلیل این امر می‌تواند مناسب بودن بازدهی حذف در تمامی زمان‌ماندها باشد؛ بنابراین این‌گونه استنباط می‌شود که زمان‌ماند ۱ day بی‌هوازی ۴ hr هوازی

جدول ۳ - نتایج آنالیز فاضلاب صنعتی ورودی و خروجی شهرک صنعتی فاز ۲ ارومیه از سیستم IFAS

Table 3 The results of the analysis of input and output of industrial wastewater (Urmia Industrial estates 2) from the IFAS system

HRT	COD (mg/l)		BOD (mg/l)		TSS (mg/l)		pH	
	Input	output	Input	output	Input	output	Input	output
1 d (An)	590	214	336	202	201	-	6.87	-
2 d (An)	647	297	356	196	236	-	6.65	-
3 d (An)	505	215	308	179	189	-	6.80	-
1 d (An), 4 hr (Ae)	214	55	202	28	-	10	-	7.26
1 d (An), 6 hr (Ae)	214	40	202	22	-	9	-	7.28
1 d (An), 8 hr (Ae)	214	33	202	19	-	5<	-	7.35
2 d (An), 4 hr (Ae)	297	65	196	34	-	12	-	6.82
2 d (An), 6 hr (Ae)	297	49	196	26	-	11	-	6.97
2 d (An), 8 hr (Ae)	297	33	196	20	-	5<	-	6.90
3 d (An), 4 hr (Ae)	215	42	179	19	-	15	-	7.00
3 d (An), 6 hr (Ae)	215	31	179	15	-	5<	-	7.14
3 d (An), 8 hr (Ae)	215	26	179	14	-	5<	-	7.39

TSS همانند BOD در خروجی سیستم IFAS کمترین مقدار را دارا است که آن هم به دلیل پایین بودن بار الی مواد ورودی است (Monazami et al. 2020).

نتایج حاصل از آنالیز کیفیت فاضلاب (فاضلاب صنعتی فاز ۲) ورودی به سیستم بی‌هوازی و IFAS به همراه نتایج آنالیز پساب خروجی از این سیستم در زمان‌ماندهای مختلف (day ۱، ۲ و ۳ بی‌هوازی ۴hr، ۶ و ۸ هوازی) در جدول (۴) نشان داده شده است. غلظت عناصر Ag، Al، B، Be، Cd، Co، Cr، Cu، Ni، Se و V در ورودی پایلوت کمتر از حد تشخیص دستگاه ICP است.

برای راهبری سیستم غلظت MLSS، MLVSS، pH، دما، DO و غیره به صورت روزانه پایش می‌شد که میزان MLSS در طول مدت تحقیق در محدوده ۱۳۸۰ mg/l تا ۳۲۷۰ و میزان MLVSS نیز ۱۱۰۴ mg/l تا ۲۶۱۶ بود.

با افزایش HRT (به دلیل جریان پیوسته فاضلاب درون سیستم و ثابت بودن زمان ماند واحد ته‌نشینی ثانویه) میزان حذف TSS افزایش پیدا می‌کند (Monazami et al. 2020). بیشترین و کمترین میزان حذف TSS در HRT ۲ day بی‌هوازی ۸ hr هوازی (۹۷/۹٪) و ۳ day بی‌هوازی ۴ hr هوازی (۹۱/۸٪) است. با توجه به پایین بودن غلظت TSS در پساب خروجی در تمامی زمان‌ماندها نیازی به افزایش SRT (۱ day بی‌هوازی ۴ hr هوازی) نیست (شکل ۴).

مقایسه نتایج بازدهی حذف BOD و TSS پایلوت با داده‌های واقعی به دست آمده از فاضلاب تصفیه‌خانه نشان داد استفاده از IFAS با کاهش محسوس این پارامترها همراه است؛ بنابراین با توجه به نتایج و نیز استناد به منابع علمی، از لحاظ میزان TSS این نوع فاضلاب مناسب برای انواع سیستم‌های آبیاری است (Anonymous 2009).

کارایی سیستم تصفیه بیولوژیکی IFAS در حذف TSS از فاضلاب خام در HRTهای مختلف نشان می‌دهد که غلظت

جدول ۴ - نتایج آنالیز شیمیایی پساب خروجی، فاضلاب صنعتی فاز ۲ از سیستم IFAS در زمان‌ماندهای مختلف
Table 4 The results of the chemical analysis of the effluent, industrial wastewater phase 2 from the IFAS system at different times (mg/l)

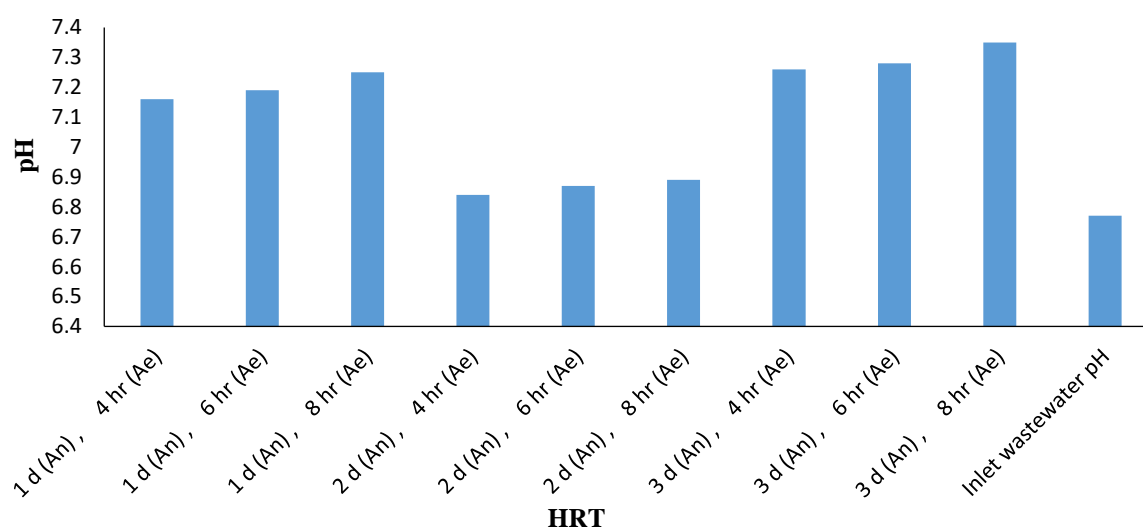
HRT	As	Ba	CN ⁻	Mo	Zn	Fe	Mn	NH ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ²⁻
Sewage inlet (average)	0.05	0.07	0.06	0.05	0.05	1.2	0.1	2.70	27.9	2.64
1 d (An), 4 hr (Ae)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.1>	0.73	8.8	<0.02
1 d (An), 6 hr (Ae)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.1>	0.57	7.1	<0.02
1 d (An), 8 hr (Ae)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1>	0.1>	0.48	5.4	<0.02
2 d (An), 4 hr (Ae)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.11	0.1>	0.64	7.7	<0.02
2 d (An), 6 hr (Ae)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	1.14	0.1>	0.46	3.9	<0.02
2 d (An), 8 hr (Ae)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1>	0.1>	0.29	2.1	<0.02
3 d (An), 4 hr (Ae)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.09	0.1>	0.52	8.0	<0.02
3 d (An), 6 hr (Ae)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08	0.1>	0.16	2.6	<0.02
3 d (An), 8 hr (Ae)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1>	0.1>	0.02>	1.5	<0.02

۳-۵- تغییرات pH

pH در خروجی افزایش یافت. نتایج آنالیز pH فاضلاب نمونه‌برداری شده از فاضلاب فاز ۲ نشان داد که این فاضلاب در اکثر مواقع نزدیک ۷ و تقریباً حالت اسیدی بوده و نیاز به متعادل‌سازی pH داشت. به دلیل نقش اساسی pH در راهبری سیستم بی‌هوازی ضروری بود این پارامتر همواره آنالیز و در صورت لزوم با افزودن ترکیبات قلیایی میزان آن تنظیم شود.

مقایسه تغییرات pH پساب خروجی فاز ۲ از راکتور IFAS در زمان‌ماندهای مختلف و شرایط مختلف بهره‌برداری در نمودار شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به نمودار، pH خروجی پساب با افزایش زمان ماند افزایش پیدا کرده بود.

مقایسه روند تغییرات pH با روند تغییرات بازدهی حذف COD نشان داد که با افزایش بازدهی حذف COD، مقدار



شکل ۵ - مقایسه تغییرات pH پساب خروجی فاز ۲ از راکتور IFAS در HRT های مختلف و شرایط مختلف بهره‌برداری
Fig. 5 Comparison graph of pH changes of phase 2 effluent from the IFAS reactor at different HRT and operating conditions

در رهنمود کیفی آیرس^۱، محدوده مناسب pH برای آبیاری محدوده pH قابل قبول برای پساب، از نظر استاندارد سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا بین ۶ تا ۸/۵ است. همچنین (Westcot et al. 1985).

^۱Aires

نظارت راهبردی ریاست جمهوری (Anonymous, 2009). نتایج حاصل از این پژوهش و شرایط COD، BOD و TSS فاضلاب تصفیه شده با روش تلفیقی سیستم راکتور بی‌هوازی و لجن فعال با رشد چسبیده (IFAS) این پساب می‌تواند در گروه ب استاندارد ارائه شده در نشریه فوق (کیفیت متوسط از لحاظ مصارف صنعتی) و گروه ج (کیفیت ضعیف و مناسب برای خنک‌کننده‌ها) قرار گیرد.

جدول ۵ - خصوصیات پساب (شهرک صنعتی فاز ۲ ارومیه) حاصل از تصفیه با IFASE

Table 5 Characteristics of wastewater (Urumieh phase 2 industrial estates) resulting from treatment with IFASE

Sample name	SAR	Classification	EC	Classification	Classification based on Wilcox
Wastewater Urmia 2	3.61	S1	2720	C3	S1C3

۳- بهینه‌ترین HRT مورد استفاده برای فاضلاب صنعتی (فاز ۲ ارومیه) یک day بی‌هوازی ۴ hr هوازی است. این HRT علاوه بر تأمین بازدهی مناسب حذف آلاینده‌ها دارای صرفه اقتصادی از نظر حجم راکتور و مصرف انرژی است.

۴- بالاترین بازدهی حذف COD با HRT ۲ day بی‌هوازی ۴ hr هوازی (۸۸/۷۱٪)، BOD ۳ day بی‌هوازی ۸ hr هوازی (۹۲/۱۱٪) و TSS ۲ day بی‌هوازی ۸ hr هوازی (۹۷/۹۰٪) در سیستم تصفیه فاضلاب صنعتی فاز ۲ ارومیه مشاهده شد.

۵- بر اساس روش ویلکاکس پساب خروجی فاز ۲ جزء آب‌های متوسط بوده و برای استفاده برای آبیاری مناسب هستند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های تولیدشده در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- Anonymous, (2009). Guidelines for quality classification of raw water, effluent, and reused water for industrial and recreational use. *Office of Deputy for Strategic Supervision Ministry of Energy*.
- Asano, T., Joseph, A., & Cotruvob, C. (2004). Groundwater recharge with reclaimed

در همین استاندارد محدوده pH مجاز برای استفاده از پساب در کشاورزی بین ۶ تا ۹ باید باشد (Djadé et al. 2021). با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده مشاهده شد که pH مورد مطالعه قابلیت کاربرد در کشاورزی دارد.

۳-۶- قابلیت استفاده پساب در مصارف صنعتی

بر اساس گروه‌بندی آب‌های مصرفی صنعتی مطابق نشریه شماره ۴۶۲ مورخ ۱۳۸۸ انتشارات معاونت برنامه‌ریزی و

۳-۷- قابلیت استفاده پساب در مصارف کشاورزی

بر اساس روش ویلکاکس پساب خروجی فاز ۲ (جدول ۵) جزء آب‌های متوسط بوده و برای استفاده برای آبیاری مناسب هستند. همچنین پساب خروجی از این سیستم از نظر WHO برای مصارف کشاورزی از جمله آبیاری قطره‌ای، سنتی، آبیاری بارانی برای مراتع و درختان، آبیاری چمن‌ها، زمین‌های ورزشی و فضای سبز مناسب است.

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- بازدهی حذف COD، BOD و TSS از فاضلاب صنعتی شهرک صنعتی فاز ۲ ارومیه در زمان‌ماندهای ۲ day بی‌هوازی ۸ hr هوازی، ۳ day بی‌هوازی ۶ hr هوازی و ۳ day بی‌هوازی ۸ hr هوازی در حد مطلوب است.
- ۲- سازگاری میکروارگانیسم‌ها در تشکیل بیوفیلم برای رسیدن به حالت پایدار در سیستم IFAS حداکثر در ۳۵ day اتفاق افتاد بعد از این زمان تغییر محسوسی در بازدهی حذف COD مشاهده نگردید.

municipal wastewater, health and regulatory considerations. *Water Res.*, 38: 1941-1951

- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and Drainage, Food and Agriculture Organization, Rome*.

- Azimi, A., Mehrdadi, N., Babi, B. G. R., & Houshyari, B. (2007). Enhanced COD and nutrient removal efficiency in a hybrid integrated fixed film activated sludge process. *Iran. J. Sci. Technol. Trans. B: Eng.*, 31(5), 523-533.
- Azimi, E., & William, A. T. (2010). Industrial Wastewater Treatment. *Tehran Industrial Estates Company Publication*, 2 [in Persian].
- Chalampol, J., Nuttapon, P., Tanakarn, M., Aran, I., & Pichaya, I. (2022). Advancement on mixed microalgal-bacterial cultivation systems for nitrogen and phosphorus recoveries from wastewater to promote sustainable bioeconomy. *Biotechnol.*, 360, 198-210. DOI: [10.1016/j.jbiotec.2022.11.008](https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2022.11.008)
- Daei, M., Alizadeh, A., Farid Hosseini, A., & Rashidi, A. M. (2016). Evaluation of Performance and Optimization of Horizontal Roughing Filter (HRF) to Reduce Turbidity and Suspended Solids from the Wastewater Treatment Plant Outflow for Agriculture Use. *Iran. Irrig. Drain. J.*, 11 (2), DOI: 681-472-990-954 [in Persian].
- Deng, Y., Bing, L., Ke, Y., & Tong, Z. (2016). Biotransformation and adsorption of pharmaceutical and personal care products by activated sludge after correcting matrix effects. *Sci. Total Environ.*, 544, 980-986. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2015.12.010](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.010)
- Djade, P. J. O., Keumeane, K. N., Traore, A., Soro, G., & Soro, N. (2021). Assessment of Health Risks Related to Contamination of Groundwater by Trace Metal Elements (Hg, Pb, Cd, as and Fe) in the Department of Zouan-Hounien (West Côte d'Ivoire). *J. Geosci. Environ. Protect.*, 9, 189-210. DOI: [10.4236/gep.2021.98013](https://doi.org/10.4236/gep.2021.98013)
- Falahati, H. M., Karimi, A. J., & Rakhshandaro, G. (2016). Effect of HRT on performance of membrane bioreactor in urban wastewater treatment. *Water Wastewater*, 28(4), 93-102, DOI: [10.22093/wwj.2017.45876](https://doi.org/10.22093/wwj.2017.45876) [in Persian].
- Hashemi, M., Rezaee, A., & Hossini, H. (2015). Assessment of national sanitation foundation water quality index and other quality characterization of Mamloo dam and supporting streams. *Int. J. Environ. Eng.*, 4(3), 1-7. DOI: [10.4103/2277-9183.170711](https://doi.org/10.4103/2277-9183.170711)
- Jabari, P., Munz, G., & Oleszkiewicz, J. A. (2014). Selection of denitrifying phosphorous accumulating organisms in IFAS systems: comparison of nitrite with nitrate as an electron acceptor. *Chemosphere*, 109, 20-27. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2014.03.002](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.002)
- Jalili, F. (2017). Effect of salinity and sodium absorption ratio (SAR) of irrigation water on yield and ion ratios in two cultivars of rapeseed (*Brassica napus* L). *Electron. J. Soil Manage. Sustain. Product.*, 8, (1), 175-182, DOI: [10.22069/ejsms.2018.13470.1751](https://doi.org/10.22069/ejsms.2018.13470.1751) [in Persian].
- Kiranmai, D., Jyothirmay, A., & Murty, C.V.S. (2005). Determination of kinetic parameters in fixed-film bio-reactors: an inverse problem approach. *Biochem. Eng. J.*, 23, 73-83. DOI: [10.1016/j.bej.2004.10.005](https://doi.org/10.1016/j.bej.2004.10.005)
- Kube, M., Fan, L., Roddick, F., Whitton, R., Pidou, M., & Jefferson, B. (2022). High rate algal systems for treating wastewater: A comparison. *Algal Res.*, 65, 102754. DOI: [10.1016/j.algal.2022.102754](https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102754)
- Liu, Q., Zhao, Z., Li, H., Su, M., & Liang, S.-X. (2021). Occurrence and removal of organic pollutants by a combined analysis using GC-MS with spectral analysis and acute toxicity. *Ecotoxic. Environ. Safe.*, 207, 111237. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2020.111237](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111237)
- Malovanyy, A., Trela, J., & Plaza, E. (2015). Mainstream wastewater treatment in integrated fixed film activated sludge (IFAS) reactor by partial nitrification/anammox process. *Bioresour. Technol.*, 198, 478-487. DOI: [10.1016/j.biortech.2015.08.123](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.123)
- Monazami Tehrani, G., Borgheipour, H., & Nezampour, A. (2020). Reuse of Varamin Vegetable Oils Industry Wastewater by Using IFAS Method. *Env. Sci. Tech.*, 22(2), DOI: [10.22034/jest.2018.35075.4216](https://doi.org/10.22034/jest.2018.35075.4216) [in Persian].
- Mustafaei, F. (2006). Investigating the performance of integrated fixed bed activated sludge system (IFAS) in removing nutrients



- from wastewater. *10th National Environmental Health Conference*, DOI: [10.22034/jest.2018.35075.4216](https://doi.org/10.22034/jest.2018.35075.4216) [in Persian].
- Nakayama, F. S., & Bucks, D. A. (1991). Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrig. Sci.*, 12. DOI: [10.1007/BF00190522](https://doi.org/10.1007/BF00190522)
- Santos, A. D., Martins, R. C., Quinta-Ferreira, R. M., & Castro, L. M. (2020). Moving bed biofilm reactor (MBBR) for dairy wastewater treatment. *Energy Report.*, 6, 340-344. DOI: [10.1016/j.egy.2020.11.158](https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.158)
- Selvabharathi Gopal, S., Robert Ravi, S., & Chinna, E. (2022). Treatment of dairy wastewater by using moving bed biofilm reactor sequential with integrated fixed-film sludge. *Innov. Res. Technol.*, 8(10)
- Shabir, G., Afzal, M., Tahseen, R., Iqbal, S., Khan, Q. M., & Khalid, Z. M. (2013). Treatment of oil refinery wastewater using pilot scale fed batch reactor followed by coagulation and sand filtration. *Am. J. Environ. Protect.*, 1, 10-13. DOI: [10.12691/env-1-1-2](https://doi.org/10.12691/env-1-1-2)
- Shakeri, N., Amooey, A. A., Amoei, A., & Tahmasebizadeh, M. (2021). Evaluation of an Anaerobic/Aerobic System for Reactive Black 5 Removal: Kinetic Study. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, 40(5). DOI: [10.30492/ijcce.2020.43235](https://doi.org/10.30492/ijcce.2020.43235)
- Sharjeel, W., & others. (2020). Recent progress in integrated fixed-film activated sludge process for wastewater treatment: A review. *J. Environ. Manage.*, 288. DOI: [10.1016/j.jenvman.2020.110718](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110718)
- Shiva Kumar, B., & Venkateswarlu. Ch. (2014). Inverse Modeling Approach for Evaluation of Kinetic Parameters of a Biofilm Reactor Using Tabu Search. *Water Environ. Res.*, 68(8), 675-686. DOI: [10.2175/106143014X13975035525708](https://doi.org/10.2175/106143014X13975035525708)
- Talebi, B., Sajjadi, N., & Sharmad, T. (2017). Evaluation of Drinking and Agricultural Water Quality in the North of Qazvin Plain's Springs, *Res. J. Marine Sci. Tech.*, 12(2), 1-16, DOI: [20.1001.1.17352347.1399.16.3.11.9](https://doi.org/20.1001.1.17352347.1399.16.3.11.9) [in Persian].
- Trojanowicz, K., Trela, J., & Plaza, E. (2021). Possible mechanism of efficient mainstream partial nitrification/anammox (PN/A) in hybrid bioreactors (IFAS). *Environ. Technol.*, 42(7). DOI: [10.1080/09593330.2019.1650834](https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1650834)

