University of Tehran Press

Journal of Environmental Studies
Vol. 49, No. 2, Summer 2023

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir
Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Development of Urban Wastewater Treatment Model Using Nano Bubbles with an Emphasis on Increasing the Efficiency of Wastewater Treatment

Nosratalah Yarahmadi[1], Naser Mehrdadi[2]✉, Majid Baghdadi[3]

1. Department of Civil & Environmental Engineering, Kish campus, University of Tehran, Kish, Iran, Email: a.yarahmadi@ut.ac.ir
2. Department of Civil & Environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: mehrdadi@ut.ac.ir
3. Department of Civil & Environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: m.baghdadi@ut.ac.ir

Article Info

Research Article:
Research Paper

Article history:
Received 26 March 2023
Received in revised from
19 July 2023
Accepted 12 August 2023
Publish online 13 August 2023

Keywords:
Aeration,
Nanobubble,
Removal efficiency
Wastewater,
Wastewater treatment,

ABSTRACT

Activated sludge process is one of the most widely used methods of urban wastewater treatment. The purpose of this study is to use nanobubbles to supply oxygen to the aeration reactor in the activated sludge process and to evaluate its performance in terms of increasing the efficiency of wastewater treatment, reducing energy consumption, reducing the amount of excess sludge and its impact on environmental factors. The results showed that the use of nano-bubble compared to the use of macro-sized bubbles increased the concentration of dissolved oxygen in the aeration reactor up to 3 mg/liter, 18% reduction in energy consumption, 10% reduction in the initial investment in the construction of the wastewater treatment plant. 15% reduction in operating costs of the sewage treatment plant. Increasing the efficiency of removing organic pollutants and reducing the hydraulic retention time in the aeration system, reducing the size of the treatment plant by 10% due to the increase in the efficiency of removing organic substances, and as a result, reducing the hydraulic time and reducing the same amount of land for the construction of the aeration reactor and facilities for the production and distribution of air in the aeration reactor. The presented model, which is obtained by using nano-bubbles in the aeration process of bioreactors, is very effective as a new and innovative technology in preserving, cleaning, and sustaining the environment.

Cite this article: Yarahmadi, N., Mehrdadi, N., Baghdadi, M. (2023). Development of Urban Wastewater Treatment Model Using Nano Bubbles with an Emphasis on Increasing the Efficiency of Wastewater Treatment. Journal of Environmental Studies, 49 (2), 203- 220.
DOI: http//doi.org/10.22059/JES.2023.355942.1008391

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/JES.2023.355942.1008391

Extended Summary

Introduction

In the field of wastewater treatment, suspended growth processes play a crucial role in the purification of wastewater. These processes involve the use of appropriate mixing methods to keep microorganisms responsible for purification suspended in the liquid. While many suspended growth processes used in urban and industrial wastewater treatment rely on high dissolved oxygen concentration (aerobic processes), there are also cases where anaerobic suspended growth reactors, without the presence of oxygen, are employed. This is particularly true for treating industrial wastewater with a high concentration of organic substances or organic sludge. Among the various suspended growth processes, the activated sludge process is the most commonly used method for urban wastewater treatment.

Materials and methods

In this study, the comprehensive and detailed application of nanobubbles in biological processes has been investigated based on years of experience in operating municipal and industrial wastewater treatment plants and observing the main issue in aerobic reactors, which is the lack of dissolved oxygen. According to the definition of microbubbles, bubbles with dimensions ranging from 10 to 50 micrometers, and nanobubbles, bubbles with dimensions smaller than 200 nm, have been considered. Microscale bubbles, especially nanobubbles, possess distinctive properties such as low floating velocity conforming to Stokes' law in microbubbles and Brownian motion in nanobubbles, long bubble retention time in the fluid, oxidizing capability, negative zeta potential, high gas transfer and dissolution in the fluid, an extremely high surface-to-volume ratio for microscale bubbles, high diffusion and completely random motion, as well as the presence of negative OH ions on the bubble surface.

Moreover, the use of gases other than air in the production of micro-nano bubbles and their physical properties in both aqueous and non-aqueous fluids still require extensive interdisciplinary research. The unique properties of nanobubbles make them highly applicable in various industries. Therefore, the development of nanobubble technology, advanced nanobubble identification techniques, highly efficient gas-liquid mixing methods, and their industrial and medical applications have become one of the most important areas of interdisciplinary and applied research.

It is worth mentioning that the production of microscale bubbles is carried out through various methods, including cavitation, vortex pumps, and the use of porous ceramic pipes. Among these methods, cavitation, vortex pumps, and ceramic porous pipes are currently important and widely used approaches for producing nanobubbles.

Results and Discussion

All the parameters studied in this research were based on the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Pilot performance results in providing dissolved oxygen (DO) to aeration reactors:

Pilot Performance Results in Providing Dissolved Oxygen (DO) to Aeration Reactors

The long lifespan of nanobubbles in water, combined with their larger interface surface area, enhances the mass transfer coefficient of oxygen from the bubbles to the liquid phase, resulting in increased oxygen solubility. In other words, nanobubbles significantly enhance the oxygen transfer capacity compared to conventional aeration systems. The results clearly demonstrate a substantial increase in the dissolved oxygen concentration in aeration reactor number 2 (nanobubble pilot).

Pilot performance results in BOD5 removal:

The significant increase in dissolved oxygen concentration within the aeration reactor, facilitated by the presence of nanobubbles, creates favorable conditions for microbial activity and promotes the consumption of organic materials. Additionally, the collapse of nanobubbles generates free radicals, which contribute to the decomposition of organic substances. Consequently, a substantial improvement in BOD5 removal efficiency is observed.

The results of pilot performance in removing COD:

The introduction of nanobubbles through air injection into the aeration reactor leads to an increase in dissolved oxygen concentration. This rise in oxygen availability supports the growth and activity of microorganisms, resulting in improved pollution removal efficiency. The collapse of pollutants is primarily attributed to the production of free radicals by nanobubbles. When free radicals are generated, recalcitrant components of the pollutants degrade, making them more accessible for microorganisms. Consequently, the percentage of pollutant removal and wastewater treatment efficiency are enhanced.

The findings discussed above highlight the positive impact of utilizing nanobubbles in wastewater treatment, particularly in terms of dissolved oxygen supply, BOD5 removal, and COD reduction. These outcomes align with previous studies

and reinforce the notion that nanobubble technology can be an effective approach for enhancing the efficiency of industrial wastewater treatment processes and reducing the levels of organic pollutants.

Conclusion

The pilot system used in this study was designed and implemented at a semi-industrial scale. As a result, the obtained results are more realistic and applicable to real-sized treatment plants, making them more reliable for use in articles and the design of treatment facilities. The obtained results have undergone rigorous filtration and validation. Multiple measurements were conducted using different methods and equipment, and comparisons were made with the aeration method using a blower. This process enhances the reliability of the results. One of the important advantages of using nanobubble in wastewater treatment is the reduction of electrical energy consumption by about 50% compared to other methods in the aeration sector. This will reduce the production of greenhouse gases. One of the significant advantages of utilizing nanobubbles in wastewater treatment is the substantial reduction in electrical energy consumption, up to 50%, compared to other aeration methods. This reduction contributes to a decrease in greenhouse gas emissions. Laboratory analyses and examination of the BOD5 and COD concentrations in the influent and effluent of the pilot system demonstrated a remarkable removal efficiency of approximately 95%. The measurement of dissolved oxygen (DO) serves as an essential indicator in wastewater treatment processes, reflecting the efficiency of the air production and distribution system. In this pilot study, it was observed that the dissolved oxygen supply can be easily adjusted and maintained at a DO level of up to 3 mg/liter.

In conclusion, the findings of this study highlight the effectiveness of using nanobubbles in wastewater treatment, offering benefits such as enhanced removal efficiencies, reduced energy consumption, and improved dissolved oxygen levels. These outcomes support the potential application of nanobubble technology in the design and optimization of wastewater treatment plants, leading to improved environmental sustainability.

نشـــریه محیـــط شناســـی

دوره ۴۹، شمـــاره ۲، تابستان ۱۴۰۲

Journal Homepage: http://Jes.ut.ac.ir

شاپای چاپی: ۸۶۲۰- ۱۰۲۵ ۶۹۲۲- ۲۳۴۵ :شاپای الکترونیکی

University of Tehran Press

توسعه مدل تصفیه فاضلاب شهری با استفاده از نانو حباب با تاکیدی بر افزایش راندمان تصفیه فاضلاب

نصرت‌الله یاراحمدی[۱]، ناصر مهردادی[۲]✉، مجید بغدادی[۳]

۱. گروه مهندسی عمران محیط زیست، پردیس کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران، رایانامه: a.yarahmadi@ut.ac.ir
۲. گروه مهندسی عمران محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران، ایران، رایانامه: mehrdadi@ut.ac.ir
۳. گروه مهندسی عمران محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران، ایران، رایانامه m.baghdadi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

کلیدواژه‌ها:
تصفیه فاضلاب، راندمان حذف، فاضلاب هوادهی، نانوحباب.

چکیده

تامین اکسیژن در راکتورهای هوادهی از جمله عوامل مهم در فرایند لجن فعال در تصفیه فاضلاب شهری است. در این مطالعه، از نانو حباب برای تامین اکسیژن در راکتور هوادهی استفاده شده است و عملکرد آن در بهبود راندمان تصفیه فاضلاب، کاهش مصرف انرژی، کاهش مقدار لجن مازاد و تأثیر آن بر عوامل زیست محیطی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای تولید نانوحباب از یکدستگاه ژنراتور نانو حباب استفاده شده است که تاییدات لازم را از ستاد نانو دریافت نموده است و ابعاد و مشخصات حباب‌های تولیدی مطابق با مشخصات نانو حباب‌ها را دارد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از نانو حباب، در مقایسه با ماکرو حباب باعث افزایش غلظت اکسیژن در راکتور هوادهی تا ۳ میلی‌گرم در لیتر، کاهش ۱۸ درصدی مصرف انرژی، کاهش ۱۰ درصدی سرمایه گذاری اولیه در تصفیه‌خانه فاضلاب و کاهش ۱۵ درصدی هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. همچنین، استفاده از نانو حباب‌ها منجر به افزایش بازدهی حذف مواد آلاینده آلی و کاهش زمان ماند هیدرولیکی در سیستم هوادهی شده است. در نتیجه، این روش باعث کاهش ابعاد واحدهای تصفیه فاصلاب می‌شود که به دلیل افزایش راندمان حذف مواد آلی و کاهش زمان هیدرولیکی می‌باشد. مدل ارائه شده بر اساس نانو حباب‌های هوا در فرآیند هوادهی بیوراکتورها، به‌عنوان یک فناوری جدید و نوآورانه در حفظ، پاکسازی و پایداری محیطزیست بسیار موثر می‌باشد.

استناد: یار احمدی، نصرت الله.؛ مهردادی، ناصر.؛ بغدادی، مجید. (۱۴۰۲). توسعه مدل تصفیه فاضلاب شهری با استفاده از نانو حباب با تاکیدی بر افزایش راندمان تصفیه فاضلاب. نشریه محیط‌شناسی، ۴۹(۲)، ۲۰۳- ۲۲۰.
DOI: http//doi.org/10.22059/JES.2023.355942.1008391
DOR: 20.1001.1.10258620.1402.49.2.3.5

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: http//doi.org/ 10.22059/JES.2023.355942.1008391

۱- مقدمه

در این مقاله، مدلی برای بهبود فرآیند تصفیه فاضلاب شهری با استفاده از تکنولوژی نانوحباب ارائه شده است. این مدل شامل پارامترهای مهمی است که برای بهبود فرآیند تصفیه فاضلاب شهری لازم است مورد بررسی قرار گیرند. در این مقاله، ابتدا به معرفی تکنولوژی نانوحباب و روش تولید آن پرداخته شده است. سپس به شرح مدل پیشنهادی برای بهبود فرآیند تصفیه فاضلاب با استفاده از تکنولوژی نانوحباب پرداخته شده است. در این بخش، پارامترهای مؤثر در فرآیند تصفیه فاضلاب شناسایی و روش‌های استفاده از نانوحباب برای بهبود هر یک از این پارامترها بررسی شده است. در انتها، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از مدل پیشنهادی برای تصفیه فاضلاب شهری با استفاده از نانوحباب به تفصیل بررسی شده و مزایا و معایب استفاده از این تکنولوژی برای تصفیه فاضلاب شهری مورد بحث قرار گرفته است.

در حوزه تصفیه فاضلاب، فرآیند لجن فعال به عنوان یکی از روش‌های پرکاربرد واکاوی شده است. این روش با تجزیه و تحلیل دقیق و کنترل بهینه، امکان تصفیه انواع مختلف فاضلاب‌هایی که از مواد قابل تجزیه بیولوژیکی تشکیل شده‌اند را فراهم می‌کند. در این راستا، مهندسان محیطزیست باید مشخصات هر فرآیند را برای ایجاد محیطی مناسب و کنترل مؤثر تشخیص دهند (Metcalf and Eddy, Inc., 2003).

فرآیند لجن فعال اولین بار در سال ۱۹۱۳ در موسسه تحقیقاتی لورنس در ماساچوست مطرح شد و در کارگاه شبکه جمع‌آوری منچستر در انگلیس، توسط آردن و لاکت (۱۹۱۴) به کار گرفته شد. نامگذاری لجن فعال[1]، به دلیل تولید جرم فعال از میکروارگانیسم‌ها است که قادر به تثبیت مواد زائد تحت شرایط هـوازی[2] هستند. در تانک هوادهی، زمان تماس برای اختلاط و هوادهی فاضلاب ورودی با سوسپانسیون میکروبی فراهم می‌شود، که معمولاً به عنوان جامدات معلق مایع مخلوط[3] یا جامـدات معلـق فـرار مـایع[4] نامیده می‌شود. تجهیزات مکانیکی نیز برای اختلاط و انتقال اکسیژن به داخل مایع مخلوط استفاده می‌شوند. سپس مایع مخلوط شده به یک زلال‌ساز وارد می‌شود و سوسپانسیون میکروبی در زلال‌ساز ته‌نشین می‌شود و تغلیظ می‌گردد. این فرآیند، که با استفاده از لجن فعال و فاضلاب بهم خورده و هوادهی می‌شود، به عنوان تصفیه با لجن فعال شناخته می‌شود. بخشی از لجن فعال به‌طور متوالی از طریق ته‌نشینی جدا شده و خارج می‌شود یا در صورت لزوم به فرآیند بازگردانده می‌شود (Lindsay et al., 1984).

میکروارگانیسم‌های نگهداری شده به صورت معلق در مایع در سیستم‌های رشد معلق، به ویژه با غلظت اکسیژن محلول بالا (هوازی)، در بسیاری از فرآیندهای تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی استفاده می‌شوند. همچنین، راکتورهای رشد معلق بدون حضور اکسیژن (بی‌هوازی) نیز در بعضی موارد مورد استفاده قرار می‌گیرند،

با توجه به این که اکثر تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری با استفاده از سیستم بیولوژیکی اقدام به حذف مواد آلی محلول موجود در فاضلاب می‌کنند از این رو حفظ شرایط رشد برای محیط کشت مخلوط در سیستم از اهمیت به سزایی برخوردار است. شرایط محیطی، دما و pH تاثیر مهمی بر انتخاب، بقاء و رشد میکروارگانیسم‌ها دارد. با انتخاب شرایط خاص در سیستم‌های مهندسی می‌توان رشد میکروارگانیسم‌ها را برای رسیدن به اهداف تصفیه موردنظر کنترل نمود. کارایی فرایندهای بیولوژیکی مورد اسـتفاده بـرای تصفیه فاضلاب به متغیرهای مصرف سوبسترا و رشد میکروبی بهره‌برداری و طراحی مؤثر چنین سیستم‌هایی بستگی به فهم واکنش‌های بیولوژیکی انجام شده و درک اصول اساسی حاکم بر رشد میکرواگانیسم‌ها دارد. بدیهی است درک تمام شرایط محیطی موثر بر مصرف سوبسترا و سرعت رشـد میکروبی ممکن است میسر نباشد. لیکن کنترل عواملی مانند pH و مواد مغذی و تامین اکسیژن برای فراهم کردن تصفیه لازم است. حذف BOD[5] کربنه ذره‌ای و محلول و تثبیت مواد آلی موجود در فاضلاب با استفاده از انواع مختلف میکروارگانیسم‌ها مخصوصاً باکتری‌ها

[1] Activated Sludge
[2] Aerobic
[3] MLSS (Mixed Liquid Suspended Solid)
[4] MLVSS (Mixed liquid volatile suspended solids)
[5] Biological Oxygen Demand (BOD)

به روش بیولوژیکی انجام می شود. برای اکسید کردن (تبدیل) مواد آلی کربنه ذره‌ای و محلول به محصولات ساده نهایی و بیومس اضافی از میکروارگانیسم‌ها استفاده می شود. و میکرو ارگانیسم‌ها نیاز ضروری به اکسیژن دارند. هوادهی بخش مهمی در فرایند تصفیه فاضلاب می‌باشد. در فرایندهای کنونی برای تامین اکسیژن از هوادهای سطحی و یا عمقی استفاده می‌شود که هر دو روش به دلیل تولید حباب‌های[۶] هوا با ابعاد ماکرو دارای بازده پایین می‌باشند که این امر سبب مصرف انرژی زیاد و هراز گاهی مشکلات فرایندی می‌شود. سیستم‌های لجن فعال به طور گسترده‌ای در تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی استفاده می‌شود. (Treybal, 1980) یکی از اصلی‌ترین مشکلات این نوع فرایند تولید بیش از حد لجن می‌باشد. (Junkins et al., 1983) مقاله حاضر به استفاده از تکنولوژی نانوحباب برای بهبود فرآیند تصفیه فاضلاب شهری می‌پردازد. تکنولوژی نانوحباب به عنوان یک روش پیشرفته با کارایی بالا در تصفیه فاضلاب شناخته شده است. این تکنولوژی به وسیله تولید و بررسی خصوصیات نانوحباب‌ها توسط دانشمندان، مورد بررسی قرار گرفته است .(Lou-S et al., 2002) با این حال، خصوصیات دقیق نانوحباب‌ها هنوز به طور کامل مشخص نشده‌اند و بررسی آن‌ها به دلیل عدم کنترل کامل تولید و شناسایی آن‌ها، چالش‌هایی را به همراه دارد .(Lou-S et al., 2002)

نانوحباب‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: حباب‌های سطح و حباب‌های حجم. حباب‌های سطح بر روی سطوح آبگریز در محلول‌های آبی تشکیل می‌شوند و حباب‌های سطح معروف هستند .(Rafael & Robio, 2007; Attard & Tyrrel, 2002; Holmberg et al., 2003) از طرفی، حباب‌های حجم بر روی ذرات معلق در محلول تشکیل می‌شوند و حباب‌های حجم معروف هستند(Chatlin, 2009).

در مقاله حاضر، یک مدل برای بهبود فرآیند تصفیه فاضلاب شهری با استفاده از تکنولوژی نانوحباب ارائه شده است. این مدل شامل پارامترهای مهمی است که برای بهبود فرآیند تصفیه فاضلاب شهری باید مورد بررسی قرار گیرند.

در این مقاله، ابتدا به معرفی تکنولوژی نانوحباب و روش تولید آن پرداخته شده است. سپس به شرح مدل پیشنهادی برای بهبود فرآیند تصفیه فاضلاب با استفاده از تکنولوژی نانوحباب پرداخته شده است. در این بخش، پارامترهای مؤثر در فرآیند تصفیه فاضلاب شناسایی و روش‌های استفاده از نانوحباب برای بهبود هر یک از این پارامترها بررسی شده است.

در انتها، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از مدل پیشنهادی برای تصفیه فاضلاب شهری با استفاده از نانوحباب به تفصیل بررسی شده و مزایا و معایب استفاده از این تکنولوژی برای تصفیه فاضلاب شهری مورد بحث قرار گرفته است.

۲- مواد و روش ها

در این تحقیق، به بررسی جامع و کامل کاربرد نانوحباب در فرایندهای بیولوژیکی در تصفیه فاضلاب شهری پرداخته شده است. مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل نانوحباب‌ها با ابعاد کمتر از ۲۰۰ نانومتر است که دارای خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی منحصر به فردی هستند.

خصوصیات مهمی که برای تصفیه آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل نسبت سطح به حجم بالا، پایداری بالا، زمان ماند طولانی، توانایی تولید رادیکال‌های آزاد، و افزایش تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل می‌باشند. سرعت شناوری کم مطابق با قانون استوکس در میکروحباب‌ها و حرکت براونی در نانو حباب‌ها، زمان ماند طولانی حباب‌ها در درون سیال، خاصیت اکسید کنندگی، پتانسیل زتای منفی، انتقال و انحلال بسیار زیاد گاز در سیال، نسبت سطح به حجم بسیار زیاد حباب‌های ریز مقیاس، دیفیوژن بالا و حرکات کاملا تصادفی و وجود یونهای OH منفی بر روی سطح حباب می‌باشند. علاوه بر آن استفاده از گازهای دیگر در تولید میکرو- نانو حباب‌ها و کاربرد و خواص فیزیکی آنها در سیال آب و غیر آب همچنان نیاز به تحقیقات بین رشته‌ای گسترده‌ای دارد. این خواص باعث شده است که استفاده از حباب‌های ریز مقیاس در صنایع مختلف کاربرد بسیار زیادی داشته باشند. به همین دلیل فناوری ایجاد نانو حباب‌ها، فناوری‌های پیشرفته شناسایی نانو حباب، فناوری‌های اختلاط گاز و سیال با راندمان زیاد و کاربردهای آنها در مقیاس صنعتی و پزشکی، یکی از مهمترین زمینه‌های تحقیقات کاربردی و بین رشته‌ای را به خود اختصاص داده است.حباب‌های ریز مقیاس به روش های گوناگونی تولید می شوند.

---

[۶] Bubble

برای تولید نانوحباب‌ها، از روش‌هایی مانند کاویتاسیون، پمپ‌های ورتکس دوفازی و لوله‌های سرامیکی متخلخل استفاده می‌شود. این روش‌ها امکان تولید نانوحباب‌ها یی با اندازه ویژه و کنترل شده را فراهم می‌کنند.

حباب‌های نانو، حباب‌ها یی با اندازه نانو با قطر زیر ۲۰۰ نانومتر هستند که دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و مکانیکی منحصر به فردی می‌باشند که به ویژه برای تصفیه آب و فاضلاب مفید هستند، به دلیل اندازه بسیار کوچک، آنها دارای نسبت سطح/ حجم بسیار بالایی هستند، که به دلیل سطح تماس بیشتر بین فازهای گاز و مایع، راندمان انتقال اکسیژن را تشدید می‌کند. به عنوان مثال، سطح تبادل حجم نانوذرات ۱۰۰ نانومتری حدود دو هزار برابر سطح همان حجم حباب‌های میکرو است و در مقایسه با حباب‌های معمولی ده‌ها میلیون برابر است.

نانوحباب‌ها با سطح بزرگتر و پایداری بیشتر نسبت به حباب‌های معمولی، توانایی طولانی ماندن در آب را دارند و اکسیژن محلول را به مدت طولانی تامین می‌کنند. این خاصیت باعث کاهش نیاز به اکسیژن در فرآیندهای تصفیه می‌شود و بهبود راندمان فرآیندها را به همراه دارد.

ظرفیت نگهداری گاز داخل آب را تا ۲۰ درصد در مقایسه با میکرو حباب‌ها افزایش دهید. علاوه بر این، نانوحباب‌ها قادر به تولید رادیکال‌های آزاد و افزایش تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل هستند. این رادیکال‌ها به عنوان عامل اکسیداسیون برای حذف مواد آلی در فرایندهای تصفیه فاضلاب استفاده می‌شوند. این فرآیند سریع و کارآمد بوده و می‌تواند هزینه‌ها و مصرف انرژی را به طور قابل توجهی کاهش دهد.

نانوحباب‌ها با سطح بزرگتر و پایداری بیشتر نسبت به حباب‌های معمولی، توانایی طولانی ماندن در آب را دارند و اکسیژن محلول را به مدت طولانی تامین می‌کنند. این خاصیت باعث کاهش نیاز به اکسیژن در فرآیندهای تصفیه می‌شود و بهبود راندمان فرآیندها را به همراه دارد.

علاوه بر این، نانوحباب‌ها قادر به تولید رادیکال‌های آزاد و افزایش تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل هستند. این رادیکال‌ها به عنوان عامل اکسیداسیون برای حذف مواد آلی در فرآیندهای تصفیه فاضلاب استفاده می‌شوند. این فرآیند سریع و کارآمد بوده و می‌تواند هزینه‌ها و مصرف انرژی را به طور قابل توجهی کاهش دهد.

به طورکلی، استفاده از نانوحباب‌ها در فرایندهای تصفیه فاضلاب شهری دارای مزایا و کاربردهای فراوانی است. این تحقیق به بررسی و آزمایش مواد و روش‌های مورد استفاده برای تولید و استفاده از نانوحباب در فرایندهای تصفیه فاضلاب می‌پردازد و نتایج جدید و مرتبط را ارائه می‌دهد.

مصرف انرژی هوادهی معمولاً ۹۰–۵۰ درصد کل انرژی مورد نیاز و بیش از ۳۰ درصد از کل هزینه‌های بهر برداری را شامل می‌شود لذا انتخاب روش مناسب هوادهی جهت حداکثر بازدهی با حداقل انرژی مصرفی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. (Irvine & Busch, 1979; Brenner, 1997).

جانگرن و همکاران (۱۹۹۸) با فرض اینکه قانون هنری در ابعاد نانو کاربرد دارد، اظهار کردند که ماندگاری نانو حباب با شعاع ۱۰ نانومتر برابر یک میکروثانیه است. بر اساس قوانین ترمو دینامیک ماکروسکوپیک حباب‌های با اندازه‌های کوچکتر از میکرون خیلی نا پایدار هستند.(Marine, 2008). داکر و زانگ (۲۰۰۷) نیز حباب‌های کوچک و نازک را کشف و نانو حباب نامگذاری کردند. داکر معتقد است که فشار داخلی حباب‌های نانو خیلی بالا نمی باشد و در حد فشار اتمسفر است و به همین دلیل است که برای چند روز نسبتا پایدار هستند. (Ducker & Zhang, 2007) طول عمر بالا از خصوصیات نانو حباب‌ها می‌باشد. (Chatlin, 2009) معمولا نانو حباب‌ها در مقایسه با میکروحباب‌ها دارای طول عمر بیشتری هستند.

هولمبرگ و همکاران (۲۰۰۳) اظهار می‌دارند که در دو دهه گذشته وجود نیروی جذب بین سطوح آبگریز در محیط‌های آبی به دلیل وجود نانوحباب‌ها گزارش شده است. هم مطالعات تئوری و هم مطالعات آزمایشگاهی وجود نانو حباب‌ها را روی این سطوح تائید کرده‌اند. راندازه‌گیری نیروی جذب وجود نانو حباب‌ها را به صورت غیر مستقیم نشان داد و تصویربرداری با میکروسکوپ نیروی اتمی نیز این موضوع را بیشتر تائید کرد. ایشهیدا و همکاران (۲۰۰۲) اظهار کردند که ادغام حباب‌ها در سطوح آبگریز عامل ایجاد پل گازی و در نتیجه نیروی جذب طولانی مدت می‌باشند (Holmberg, et al., 2003).

۲-۱ تشریح و بیان موضوع

نانو حباب ها همان‌طورکه از نامشان معلوم است حباب‌های گازی بسیار ریز در مقیاس نانو هستند که در داخل مایع حضور دارند. این حباب‌ها ویژگی‌های فیزیکی منحصر بفردی دارند که آنها را از حباب‌های معمولی متمایز میکند. از جمله مهمترین آنها می‌توان به پایداری طولانی مدت در داخل مایع به دلیل شناوری بسیار پایین و سطح باردار منفی اشاره کرد.کاربرد نانو حباب‌ها در صنایع مختلف بسیار گسترده بوده و کارایی بسیار بالای آنها ثابت شده است. برای بهبود عملکرد و کاهش هزینه هوادهی، تصفیه فاضلاب توسط سیستم‌های بیوفیلم هوازی ضروری است. هوادهی از نانولوله[۷] می‌تواند یک روش امیدوار کننده برای رسیدن به این اهداف باشد. در مقایسه با حباب‌های درشت، پروفایل اکسیژن محلول نشان داد که این نانولوله‌ها اکسیژن بیشتری را به بیوفیلم‌ها ارائه می‌دهند و ظرفیت اکسیژن رسانی عالی و ۱/۵ برابر کارایی انتقال اکسیژن را ارائه می‌دهند. هوادهی نانو حباب سرعت رشد بیوفیلم را تسریع می‌کند و با حداکثر شش برابر فعالیت دهیدروژناز و محتوای ماده پلیمری خارج سلولی بیشتر از زمان استفاده از حالت هوادهی سنتی، بازده حذف بهتری از نیاز اکسیژن شیمیایی[۸] و آمونیاک را به دست می‌آورد. این امر به افزایش متابولیسم و تکثیر میکروارگانیسم‌ها نسبت داده می‌شود. تصویربرداری میکروسکوپی اسکن لیزری کانفوکال تایید کرد که هوادهی نانولوله با جابه‌جایی جامعه میکروبی و تغییر مسیرهای متابولیکی بیوفیلم‌ها، مانند سنتز کربوهیدرات، بر اجزای بیوفیلم تأثیر می‌گذارد. هوادهی حباب نانو در حدود ۸۰ درصد باعث صرفه جویی در انرژی می‌شود. ارزیابی رشد بیوفیلم[۹] هوادهی نانو حباب نشان می‌دهد که این روش می‌تواند یک راهبرد شروع سریع، کارایی بالا و کم هزینه را برای سیستم‌های بیوفیلم هوازی در تصفیه فاضلاب ارائه دهد. حباب‌های میکرو و حباب‌های نانو دارای چندین ویژگی هستند که با حباب هایی به اندازه میلی متر و سانتی متر این ویژگی‌ها را ندارند. این ویژگی‌ها ناشی از اندازه کوچک آنها است، منجر به سطح وسیع و فعالیت زیستی زیاد، سرعت بالا رفتن پایین، کاهش کشش اصطکاک، فشار داخلی بالا، ظرفیت انحلال بزرگ گاز، سطح دارای بار منفی و توانایی خرد شدن و تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌شود. حباب‌های میکرو و حباب‌های نانو در زمینه‌های مختلفی از جمله مهندسی، کشاورزی، محیط‌زیست، غذا و دارو کاربردهایی پیدا کرده اند. از میکروبول‌ها با موفقیت در پرورش آبزیان صدف در هیروشیما، گوش ماهی در هوکایدو و مروارید در ژاپن استفاده شده است. این زمینه پتانسیل بالایی برای رشد از خود نشان داده است. به طور جامع نانو حباب و کاربرد آنها در پرورش آبزیان، محیط‌زیست ،مهندسی، پزشکی، سهامداری، کشاورزی و صنایع دریایی. این پتانسیل آنها را به عنوان یک فناوری جدید ارائه می‌دهد که می‌تواند در سطح جهانی مورد استفاده قرار گیرد .(Tsuge, 2015) استفاده از نانو حباب ویژگی‌های منحصر به فردی دارد که یک رویکرد اثبات شده و چند جانبه‌ای برای بهبود تصفیه فاضلاب ارائه می‌دهد. از افزایش بازده هوادهی و جداسازی فیزیکی گرفته تا اکسیداسیون فاقد مواد شیمیایی، این حباب‌های نانوسکوپی می‌توانند عملکرد سیستم‌های هوادهی موجود را بهبود بخشند، دوره‌های پایدار اکسیژن محلول پایین را از بین ببرند و باعث افزایش راندمان تصفیه با تاکیدی بر کاهش تقاضای اکسیژن بیولوژیکی، تقاضای اکسیژن شیمیایی و افزایش میزان حذف آمونیاک گردد. حباب‌های نانو به طور موثر برخی از چالش برانگیزترین مسائل مربوط به تصفیه فاضلاب را از طریق اکسیداسیون حباب نانو، انتقال بیش از حد کارآمد گاز، حذف سورفاکتانت و رساندن اکسیژن به لایه‌های بیولوژیکی یا فیلم از بین می‌برد. این ترکیب است که مولدهای نانو حباب را قادر می‌سازد تا سطح اکسیژن محلول را افزایش دهند، شرایط بی‌هوازی را که باعث مشکل برای فرآیند می‌شوند از بین ببرند. عملکرد فرآیند را بهبود بدهند و ترکیبات بو و خوردگی مانند سولفید هیدروژن را از بین ببرند.

۲-۲ معرفی ژنراتور تانو حباب

تولید هوا با روش نانوحباب توسط ژتراتورهای نانو حباب انجام می‌شوددر واقع تکنولوژی نانو حباب روشی برای توزیع یکنواخت گازهای مختلف مانند هوا، اکسیژن، ازن، نیتروژن، دی اکسیدکربن و ... به داخل آب استخرها و راکتورها می‌باشد. ژنراتور نانو حباب با تولید میلیاردها

---

۷ Nano-pipe
۸ Chemical Oxygen Demand (COD)
۹ Biofilm

حباب ریز در مقیاس نانو، به صورت توده ابری شکل و مملو از گاز، توانایی انتقال این گاز را با یک فرآیند خاص به داخل آب دارد. شاید بسیاری از افراد نام ژنراتور نانو حباب را شنیده باشند که در صنایع مختلف و به خصوص صنایع پرورش ماهی برای موارد و کاربردهای مختلف استفاده می‌شود.بطور کلی ژنراتور نانو حباب یک دستگاه صنعتی برای تولید حباب‌های بسیار ریز می‌باشد. با استفاده از این دستگاه ژنراتور می‌توان حجم بالایی از اکسیژن مورد نیاز استخرهای هوادهی را تامین نمود. کارشناسان معتقدند از این دستگاه می‌توان برای تصفیه فاضلاب نیز استفاده کرد.این دستگاه به عنوان جایگزین و یا کمک کننده تجهیزات هوادهی در تصفیه خانه‌های فاضلاب می‌تواند به کار گرفته شود.

۲-۳ نانوحباب و ویژگی‌های آن[10]

نانوحباب‌ها همان‌طور که از نامشان معلوم است حباب‌های گازی بسیار ریز در مقیاس نانو هستند که در داخل مایع حضور دارند. این حباب‌ها ویژگی‌های فیزیکی منحصربه فردی دارند که آنها را از حباب‌های معمولی متمایز می‌کند. از جمله مهمترین آنها می‌توان به پایداری طولانی مدت در داخل مایع به دلیل شناوری بسیار پایین و سطح باردار منفی اشاره کرد. کاربرد نانوحباب‌ها در صنایع مختلف بسیار گسترده بوده و کارایی بسیار بالای آنها ثابت شده است.

نانو حباب‌ها به روش‌های مختلفی شناسایی می‌شوند. بعضی از این روش‌ها عبارتند از (Zhang et al., 2008):

استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی[11]، استفاده از پراش اشعه ایکس[12]، استفاده از دستگاه آنالیز کننده اندازه ذرات[13]، وجود نانو حباب‌ها بار اندازه‌گیری نیروی جذب طولانی مدت واقع در بین سطوح و ذرات کلوئیدی آبگریز مشخص می‌گردد. نانو حباب‌های فاز حجم به وسیله پراش پرتو نور و نانوحباب‌های سطح با تعدادی تکنیک‌ها از جمله میکروسکوپ نوری با مد ضربه[14] قابل شناسایی هستند (Metcalf & Eddy, 1991; Chatlin, 2009; Attard & Tyrrel, 2002;) روش میکروسکوپ نوری با مد ضربه بیشتر از بقیه استفاده می‌شود. میکروسکوپ نیروی اتمی یک وسیله قدرتمند با ذرجه تفکیک بالا برای مطالعه اشیاء در اندازه‌های نانو می‌باشند. (Lou-S et al., 2002)حباب‌های نانو توسط میکروسکوپ نوری قابل تصویربرداری هستند.

هو وهمکاران (۲۰۰۳) اولین تصویربرداری از نانوحباب‌ها روی سطوح میکا در آب دیونیزه تقطیرشده به وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی مد ضربه (TMAFM) گزارش کردند. (Otsuka et al., 2003) مطالعه ادغام نانوحباب‌های کوچک و ایجاد حباب‌های بزرگتر در سطح پلی استیرن پوشیده شده با سیلیکون مستغرق در آب دیونیزه شده با میکروسکوپ نیروی اتمی توسط چو و همکاران (۲۰۰۵) انجام شد. (Rafael & Robio. 2007)

سال‌ها مطالعه و بررسی در زمینه نانوحباب‌ها منجر به کشف خواص فیزیکی آنها شده است که برخی از مهم‌ترین آنها به شرح ذیل می‌باشند.

۲-۳-۱مساحت بزرگتر سطح فصل مشترک

معادله ۲-۱ بیان کننده فصل مشترک ویژه ریز حباب‌ها می‌باشد. با کاهش قطر حباب، مساحت فصل مشترک ویژه افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه انحلال گاز در مایع به سهولت انجام می‌گیرد.

۲-۳-۲ شناوری خنثی

نانوحباب‌ها به جای حرکت عمودی به سمت بالا میتوانند با حرکن براونی مدت زمان زیادی را در داخل مایع به شکل معلق حضور داشته باشند. این حباب‌ها به دلیل حرکت براونی میتوانند در سرتاسر مایع پخش شوند.

10 Nano-bubble specification
11 AFM, Atomic Force Microscopy
12 X-ray spectroscope
13 Particle Size Analyzer
14Taping Mode Atomic Microscopy Force

۲-۳-۳ فشار بالای گاز درون حباب[15]

طبق معادله یانگ- لاپلاس اختلاف فشار درونی و بیرونی حباب رابطه‌ای مستقیم با کشش سطحی و رابطه‌ای معکوس با اندازه حباب دارد.

با کاهش اندازه حباب، فشار درونی حباب و همچنین فشار جزئی اجزای گاز حل شونده افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه اجزای گازی راحت‌تر در محیط مایع حل می‌شوند. (Tsuge, 2015)

۲-۳-۴ سطح باردار منفی

سطح باردار منفی نانوحباب‌ها مانع از ترکیب آنها با یکدیگر شده و بنابراین باعث پایداری طولانی مدت آنها در داخل مایع می‌شود (Tsuge, 2015).

۲-۳-۵ افزایش سرعت انحلال گاز

با کاهش قطر حباب، سرعت انحلال گاز افزایش می‌یابد. (Tsuge, 2015)

فناوری نانوحباب روشی نوین با کارایی بسیار بالا در توزیع یکنواخت گازهای مختلف از قبیل هوا، اکسیژن، ازن، نیتروژن، دی‌اکسیدکربن و غیره به داخل محیط مایع از قبیل آب می‌باشد. نانوحباب‌ها همان‌طور که از نامشان معلوم است حباب‌های گازی بسیار ریزی هستند که در داخل مایع حضور دارند. این حباب‌ها ویژگی‌های فیزیکی منحصر به فردی دارند که آنها را از حباب‌های معمولی متمایز می‌کند. از جمله مهمترین آنها می‌توان به اندازه بسیار ریز در مقیاس نانو، مساحت بزرگتر فصل مشترک، زمان ماند طولانی در داخل مایع به دلیل شناوری بسیار پایین، فشار بالای گاز داخلی، سطح باردار منفی و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل اشاره کرد.

۲-۳-۶ راندمان انتقال اکسیژن[16]

نیاز اصلی هر برنامه هوادهی، انتقال کارآمد اکسیژن به بدن آب است. سیستم‌های هوادهی معمولی به دلیل اندازه و سرعت افزایش سریع مربوطه، فقط ۱ درصد به ۳ درصد اکسیژن در هر فوت آب را منتقل می‌کنند. این باعث می‌شود هوادهی معمولی ناکارآمد باشد. در نتیجه، فن‌آوری نانو حباب از خواص بی‌نظیر آنها بهره می‌برد و بازده انتقال اکسیژن پیشرو در صنعت (OTE) بیش از ۸۵ درصد در هر فوت آب را به وجود می‌آورد. ماندگاری نانو حباب‌های موجود در آب، به همراه سطح بالای آنها در هر حجم، آنها را به موثرترین روش هوادهی تبدیل کرده و به بهره بردار اجازه می‌دهد تا هزینه‌های عملیاتی را به میزان قابل توجهی کاهش دهند.

۲-۴ روش اجرای پایلوت و انجام آزمایش‌ها

پایلوت در نظر گرفته شده دارای دو راکتور هوادهی می‌باشد که توسط دستگاه تولید نانو ژنراتور و دیفیوزرو لوله‌ها هوادهی می‌شوند. در این اینجا به منظور ارزیابی سامانه نانوحباب یکی از راکتورها به عنوان شاهد (راکتور هوادهی شماره ۱) و دیگری به عنوان راکتور پایلوت نانوحباب (راکتور هوادهی شماره ۲) در نظر گرفته شده اند. ارزیابی سامانه نانوحباب در فرایند تصفیه بیولوژیکی به روش لجن فعال در دو فاز تعریف شد. فاز اول به ترتیب به منظور بررسی تاثیر نانوحباب‌های هوا و اکسیژن در میزان افزایش اکسیژن محلول و کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه زمانی که بلوئرو یا میکسر هم در مدار می‌باشد. فاز دوم به منظور بررسی تاثیر نانوحباب‌های هوا و اکسیژن در تامین میزان اکسیژن محلول و کیفیت پساب خروجی زمانی که بلوئرها از مدار خارج باشد. پارامترهای موردنظر به منظور ارزیابی عملکرد سامانه نانوحباب در جدول (۱) آورده شده اند.

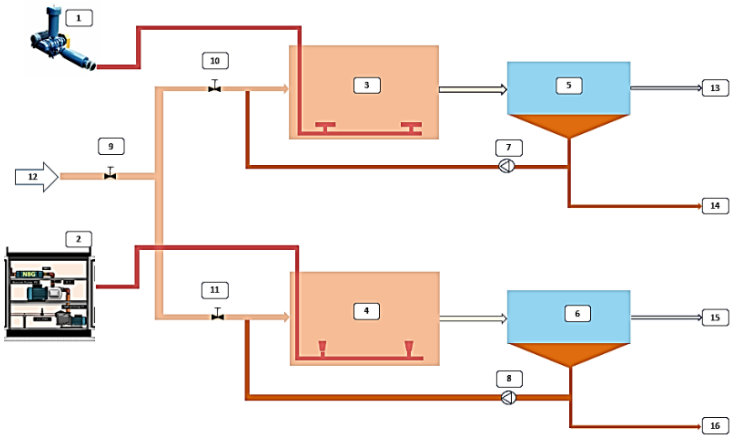
15 Internal pressure of nanobubbles
۱۶ Oxygen transfer rate

جدول ۱. پارامترهای مورد بررسی به منظور ارزیابی سامانه نانوحباب

ردیف	محل نمونه برداری	پارامترها
۱	ورودی تصفیه خانه	T, pH, DO, BOD, COD, TSS
۲	پایلوت هوتدهی شاهد و پایلوت نانو حباب	T, pH, DO, MLSS, MLVSS, SVI
۳	خروجی ته نشینی شاهد و پایلوت نانوحباب	T, pH, DO, BOD, COD, TSS, Fecal & Total Coliforms
۴	لجن برگشتی شاهد و پایلوت نانو حباب	pH, MLSS, MLVSS

به منظور اجرای فاز اول پروژه و پس ازآماده شدن شرایط پایلوت به منظور ارزیابی میدانی آزمایش‌های مربوطه، هماهنگی‌های لازم به منظور انجام آزمایش‌های پایلوت سامانه نانوحباب با یکی از آزمایشگاه‌های معتبر انجام شده است. وجهت صحت‌سنجی نتایج پارامترهای قابل اندازه‌گیری، سنجش برخی از پارامترها تو سط یکی دیگراز آزمایشگاه‌های معتمد انجام گرفته است .

به منظور پایش عملکرد پایلوت، ثبت مقادیر مربوط به تغییرات اکسیژن محلول به طور شبانه روزی انجام شده‌اند. همچنین به منظور بررسی تغییرات اعمال شده بر روی پارامترهای بهره‌برداری، نمونه‌برداری به صورت یک روز در میان از ورودی پایلوت، راکتور هوادهی، خروجی‌های ته‌نشینی و نیز لجن برگشتی انجام شد. نمونه‌های برداشت شده به آزمایشگاه منتقل شده و آزمایش‌های لازم برای تعیین پارامترهای کیفی فاضلاب بر اساس روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب انجام شده‌اند .پس از هماهنگی‌های صورت گرفته در خصوص انجام آزمایش‌های موردنظر، اولین اقدامات به منظور سنجش میزان اکسیژن محلول در راکتور هوادهی توسط اکسیژن سنج انجام شده است. پایلوت که در شکل شماره (۱) نشان داده شده است. برای تحقیقات و پژوهش طراحی و احرا شده است. پایلوت در دو مدول در نظر گرفته شده است یک مدول هوادهی با استفاده از بویلرها انجام می‌شود و در مدول دیگر برای هوادهی از دستگاه ژنراتور نانو حباب استفاده شده است.



شکل ۱. نمودار پایلوت مورد استفاده در تحقیقات

مشخصات پایلوت

۱ دستگاه تولید هوا با روش متعارف (بلوئر)
۲ دستگاه تولید نانو حباب (ژنراتور نانو حباب)
۳ راکتور هوادهی با هوادهی متعارف
۴ راکتور هوادهی نانو حباب
۵ واحد ته نشینی هوادهی متعارف
۶ واحد ته نشینی هوادهی نانو حباب
۷ پمپ برگشت لجن فاز هوادهی متعارف

۸ پمپ برگشت لجن فاز هوادهی نانو حباب
۹ شیر قطع و وصل فاضلاب خام ورودی
۱۰ شیر قطع و صل فاضلاب خام فاز هوادهی متعارف
۱۱ شیر قطع و وصل فاضلاب خام فاز هوادهی نانو حباب
۱۲ فاضلاب خام ورودی
۱۳ پساب تصفیه شده فاز هوادهی متعارف
۱۴ لجن مازاد فاز هوادهی متعارف
۱۵ پساب خروجی فاز هوادهی با نانو حباب
۱۶ لجن مازاد فاز هوادهی نانو حباب

۳- نتایج و بحث

کلیه پارامترهای مورد مطالعه براساس کتاب روش‌های استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب سال ۲۰۰۸ انجام شده است.

۳-۱ نتایج عملکرد پایلوت در تامین اکسیژن محلول راکتورهای هوادهی

بررسی عملکرد پایلوت اجرا شده و استفاده از نانو حباب همراه با راندازه‌گیری اکسیژن محلول نتایج جدیدی در حذف آلودگی‌های فاضلاب و کاهش لجن تولیدی را نشان می‌دهد.

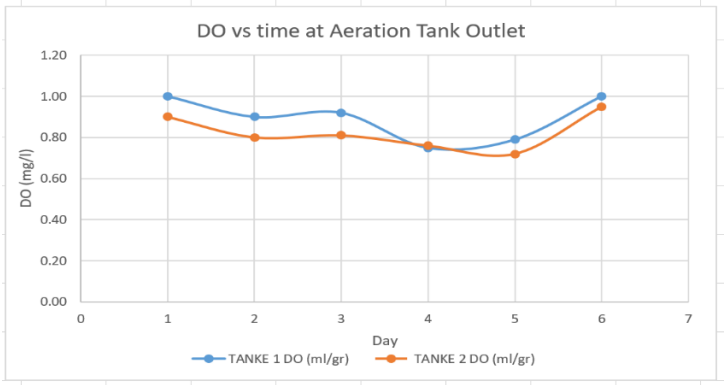
مقدار اکسیژن محلول در راکتورهای هوادهی طی شش روز متوالی در تیرماه که درجه حرارت ۲۷ در جه سانتیگراد بوده در یک ساعت خاص از روز راندازه‌گیری ودر جدول شماره (۲) ثبت شده است. در این مرحله هوادهی از طریق بلوئرها برای هر دو تانک هوادهی انجام شده است. تغیراتی که در مقدار اکسیژن محلول در ساعت‌های مختلف مشاهده می‌شود ناشی از تغیرات دبی ورودی در زمان‌های مختلف می‌باشد.

جدول ۲. عدم تزریق نانو حباب و ثبت تغییرات میزان اکسیژن محلول با زمان در استخرهای هوادهی ۱ و ۲ با تزریق هوا توسط بلوئرها

اندازه گیری اکسیژن محلول در طی ۶ روز

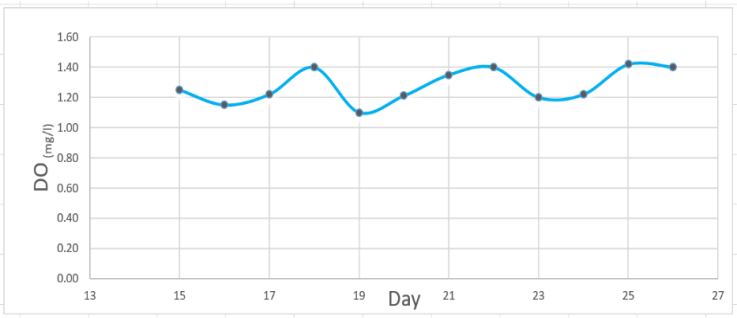
TANKE 1		TANKE 2	
Day	DO (ml/gr)	Day	DO (ml/gr)
1	1	1	0.9
2	0.9	2	0.8
3	0.92	3	0.81
4	0.75	4	0.76
5	0.79	5	0.72
6	1	6	0.95

شکل شماره (۲) نمودار حاصل از پایش اکسیژن در ۶ روز می‌باشد که مقادیر آن در جدول شماره (۲) ثبت شده است. این مقادیر در شرایط معمول پایلوت و هوادهی تنها با بلوئر می‌باشد. در ساعات مختلف مقدار اکسیژن محلول متناسب با مقدار دبی متغیر می‌باشد. سعی شده است اندازه‌گیری‌ها در یک ساعت خاص در روزهای متوالی انجام شود که بررسی‌های کارشناسی دچار خطا نگردد.



شکل ۲. تزریق هوای بلوئرها و ثبت مقادیر اکسیژن محلول راکتورهای هوادهی شماره ۱ و ۲

شکل شماره (۳) نمودار حاصل از پایش اکسیژن محلول در بین روزهای پانزدهم تا بیست و ششم تیر ماه را نشان می‌دهد. در این مرحله از نانو حباب برای تامین اکسیژن محلول استفاده شده است.



شکل ۳. نمودار راندازه‌گیری اکسیژن محلول در بین روزهای پانزدهم تا بیست و ششم تیر با تزریق نانو حباب

مقایسه شکل‌های شماره (۳ و ۲) عملکرد نانوحباب در تامین اکسیژن محلول راکتور هوادهی در مقایسه با تامین اکسیژن محلول با استفاده از بلوئر را نشان می‌دهد. میزان تامین اکسیژن محلول راکتورها وجود دارد. با مقایسه عملکرد سیستم هوادهی بلوئر و نانوحباب در تامین اکسیژن محلول راکتور شماره ۲ (قبل و بعد از استفاده از نانوحباب)، مشاهده می‌شود که اکسیژ ن محلول به دست آمده توسط ژنراتور نانوحباب بیشتر از اکسیژن به دست آمده توسط بلوئر می‌باشد. این موضوع عملکرد مطلوب استفاده از ژنراتور نانوحباب در مقایسه با بلوئر می‌باشد.

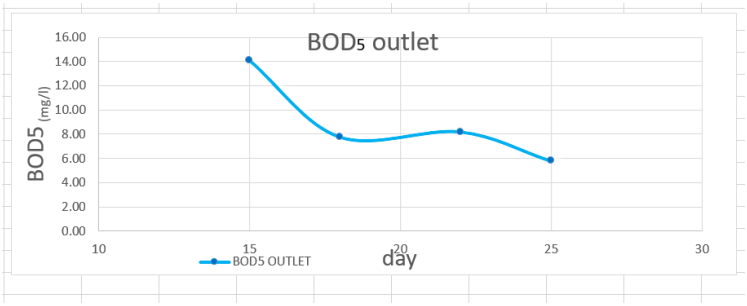
طول عمر نانوحباب‌ها در داخل آب همراه با مساحت بزرگتر سطح فصل مشترک، سبب افزایش ضریب انتقال جرم اکسیژن از حباب به داخل مایع و در نتیجه افزایش میزان حلالیت اکسیژن میشود. به بیانی دیگر نانوحباب‌ها ظرفیت انتقال اکسیژن را به طور قابل توجهی در مقایسه با سیستم‌های هوادهی مرسوم افزایش می‌دهند. (Ahmadi et al., 2018) با توجه به نتایج حاصل به وضوح مشاهده می‌شود که میزان اکسیژن محلول در راکتور هوادهی شماره ۲ (پایلوت نانوحباب) به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

۲-۳ نتایج عملکرد پایلوت در حذف BOD5

برای بررسی راندمان تصفیه خانه‌های فاضلاب می‌توان از مقایسه بین BOD5 ورودی و خروجی استفاده نمود.

نتایج آزمایش‌ها بر روی شاخص BOD5 ورودی و خروجی پس از اعمال نانو حباب طی ۱۰ روز از پانزدهم تا بیست و پنجم تیرماه جمع‌آوری و ثبت شده‌اند. شکل شماره (۴) نشان‌دهنده تغییرات BOD5 خروجی ناشی از هوادهی نانو حباب می‌باشد.

برای بررسی راندمان تصفیه خانه‌های فاضلاب می‌توان از مقایسه بین BOD5 ورودی و خروجی استفاده نمود.



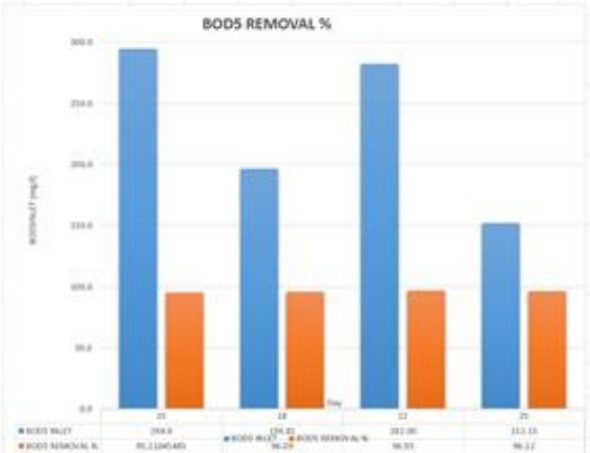
شکل ۴. راندمان حذف BOD5 از پانزدهم تا بیست و پنجم تیرماه

نتایج آزمایش‌ها بر روی شاخص BOD5 ورودی و خروجی پس از اعمال نانو حباب طی ۱۰ روز از پانزدهم تا بیست و پنجم تیرماه جمع‌آوری و ثبت شده‌اند. شکل شماره (۴) نشان‌دهنده تغییرات BOD5 خروجی ناشی از هوادهی نانو حباب می‌باشد.

افزایش قابل توجه میزان اکسیژن محلول در راکتور هوادهی توسط نانوحباب و ایجاد شرایط مناسب برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها منجر به مصرف مواد آلی بیشتری شده است. همچنین با توجه به تولید رادیکال‌های آزاد در اثر فروپاشی نانوحباب‌ها که منجر به تجزیه مواد آلی می‌گردد مشاهده می‌شود راندمان حذف BOD5 به طور قابل توجهی افزایش یابد. نتایج در جدول شماره (۳) ثبت شده‌اند و شکل شماره (۵) حاصل این جدول می‌باشد. که به خوبی راندمان حذف را نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج راندازه‌گیری BOD5 ورودی و خروجی از تاریخ ۱۵ تا ۲۵ تیر ماه ۱۴۰۱ و درصد حذف

date	BOD in (mg/l)	BOD out (mg/l)	BOD_5 REMOVAL	%
۱۵	۲۹۴.۶	۱۴.۱۱	۲۸۰.۴۹	۹۵.۲
۱۸	۱۹۶.۸۱	۷.۷۸	۱۸۹.۰۳	۹۶.۱
۲۲	۲۸۲.۰۰	۸.۲۰	۲۷۳.۸	۹۷
۲۵	۱۵۲.۱۵	۵.۸	۱۴۶.۳۵	۹۶.۱

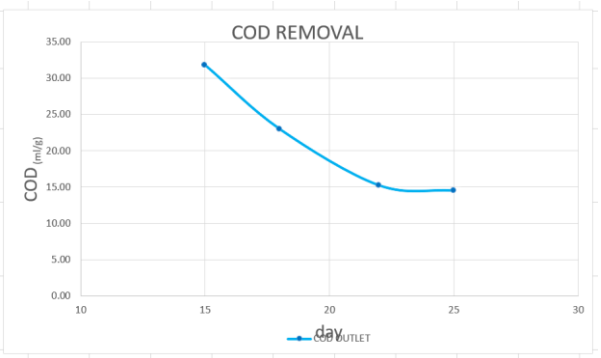


شکل ۵. وضعیت BOD5 ورودی و خروجی از تاریخ ۱۵ تا ۲۵ تیر ماه ۱۴۰۱ و درصد حذف

۳-۳ نتایج عملکرد پایلوت در حذف COD

جهت بررسی میزان حذف COD نتایج آزمایش‌ها بر روی COD ورودی و خروجی پس از هوادهی با نانو حباب در روزهای پانزدهم تا بیست و پنجم تیر ماه را اندازه‌گیری و در جدول شماره (۴) ثبت شده‌اند. همچنین در شکل شماره (۷) نشان داده شده است.

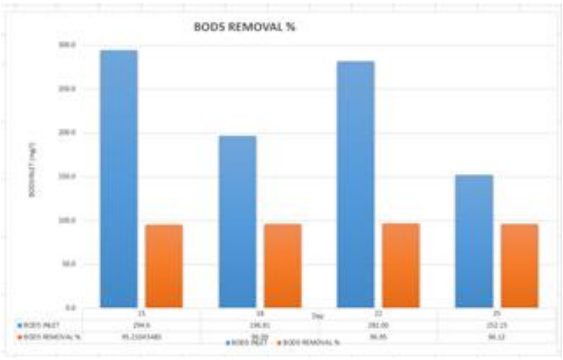
افزایش اکسیژن محلول در راکتور هوادهی که ناشی از تزریق هوا توسط سامانه نانو حباب می‌باشد. نتایج قاب قبولی در شاخص حذف آلودگی بدست آمده است . تزریق نانو حباب علاوه بر تامین اکسیژن محلول مورد نیاز فعالیت میکرو ارگانیسم‌ها، سبب فرو پاشی آلودگی‌های بیشتر شده است. این فروپاشی بیشتر ناشی از تولید رادیکال آزاد توسط نانو حباب می‌باشد. وقتی رادیکال ازاد تولید می‌شود بخش‌های مقاوم آلودگی‌ها دچار فرو پاشی می‌شوند. در نتیجه توسط میکرو ارگانیسم‌ها قابل استفاده می‌گردند. لذا درصد حذف و راندمان تصفیه فاضلاب افزایش یافته است.



شکل ۶. تغییرات CODدر پساب خروجی پایلوت نانو حباب از تاریخ ۱۵ ام تا ۲۵ ام تیر ماه سال ۱۴۰۱

date	COD in (mg/l)	COD out (mg/l)	COD5 REMOVAL	%
۱۵	۳۹۷.۰۰	۳۱.۸۲	۳۶۵.۱۸	۹۱.۹۸
۱۸	۴۵۵.۰۰	۲۲	۴۳۳	۹۶.۰۹
۲۲	۳۰۹.۰۰	۱۵.۲۳	۲۹۳.۷۷	۹۶.۹۵
۲۵	۳۱۲.۰۰	۱۴.۵	۲۹۷.۵	۹۶.۱۲

جدول ۴. نتایج راندازه‌گیری COD5 ورودی و خروجی از تاریخ ۱۵ تا ۲۵ تیر ماه ۱۴۰۱ و درصد حذف



شکل ۷: وضعیت COD5 ورودی و خروجی از تاریخ ۱۵ تا ۲۵ تیر ماه ۱۴۰۱ و درصد حذف

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از پایلوت استفاده شده نشان می‌دهد که استفاده از روش نانوحباب در فرایند تصفیه فاضلاب می‌تواند تأثیر مثبت بر روی این عوامل داشته باشد. هر چند که این روش در ابتدای راه می‌باشد و نمی‌توان به طور کامل درباره مزایا و معایب آن صحبت کرد.

نتایج به دست آمده از پایلوت در اندازه نیمه صنعتی طراحی و استفاده شده است، بنابراین نتایج به دست آمده واقعی‌تر و قابل اعتمادتر هستند و برای استفاده در مقالات و طراحی تصفیه‌خانه‌ها قابلیت استفاده و بررسی بیشتری دارند.

نتایج مورد بررسی قابل اعتماد هستند زیرا از فیلترهای مختلف و قابل اعتماد عبور کرده‌اند و با استفاده از روش‌ها و تجهیزات مختلف اندازه‌گیری شده‌اند. بنابراین، نتایج به دست آمده قابلیت اطمینان بیشتری دارند.

یکی از مزایای مهم استفاده از نانوحباب در تصفیه فاضلاب، کاهش مصرف انرژی الکتریکی به میزان حدود ۵۰ درصد نسبت به روش‌های دیگر در بخش هوادهی است. این موضوع منجر به کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

با توجه به نتایج آزمایشگاهی و بررسی غلظت BOD5 و COD در فاضلاب خام ورودی و پساب خروجی پایلوت، راندمان حذف حدود ۹۵ درصد مشاهده شده است. این راندمان نشان دهنده استفاده مناسب این تکنولوژی در فرایند هوادهی می‌باشد.

تامین اکسیژن محلول یکی دیگر از شاخص‌های فرایند تصفیه فاضلاب است که توانایی سیستم تولید و توزیع هوا را نشان می‌دهد. در این پایلوت، تأمین اکسیژن مورد نیاز براحتی قابل تنظیم و دسترسی تا ۳ میلی‌گرم در لیتر را نشان می‌دهد. با وجود تأمین اکسیژن مورد نیاز، مصرف انرژی و سرمایه‌گذاری کمتری نسبت به روش‌های معمول صورت گرفته است.

استفاده از نانوحباب‌ها باعث کاهش ابعاد حوضچه هوادهی و در نتیجه کاهش مساحت زمین مورد استفاده در ساخت تصفیه‌خانه می‌شود. مشاهده شده است که با افزایش تامین اکسیژن و سرعت تصفیه، زمان هیدرولیکی HRT کاهش می‌یابد. بنابراین، برای تصفیه دبی مشخصی، ابعاد راکتور هوادهی حدود ۱۰ درصد کوچکتر از روش‌های معمول هوادهی می‌باشد.

دستگاه نانوحباب ژنراتور مورد استفاده در این تحقیق، ساخت یکی از شرکت‌های داخلی کشور است. علاوه بر کاهش هزینه‌های خرید تجهیزات هوادهی، تامین لوازم و قابلیت دسترسی به تولیدکننده نیز یک مزیت برای تصفیه‌خانه می‌باشد.

۴-۱- مقایسه بحث در خصوص نتایج با یکی از مطالعات پیشین

مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با مطالعات پیشین در زمینه استفاده از روش نانو حباب در فرایند تصفیه فاضلاب می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را ارائه دهد. در یک مطالعه نشان داده شد که استفاده از نانو حباب در تصفیه فاضلاب شهری نشان داد که حذف مواد آلی و آلاینده‌های معدنی بهبود چشمگیری را در مقایسه با روش‌های سنتی داشته است (Ahmadi et al., 2018).

در یک مطالعه دیگر از موارد متفاوتی در خصوص استفاده از نانو حباب در تصفیه فاضلاب شهری نشان داد که به مقدار قابل توجهی اکسیژن محلول داخل راکتور هوادهی را بهبود بخشیده و حذف مواد آلی و آلاینده‌ها بهبود چشمگیری را در مقایسه با روش‌های سنتی داشته است. (Marwa et al., 2021)

این نتایج تطابقی با نتایج مطالعه حاضر دارند که نشان می‌دهد استفاده از روش نانو حباب می‌تواند در تامین اکسیژن مخلوط، کاهش آلودگی در پساب خروجی و افزایش راندمان تصفیه فاضلاب شهری مؤثر باشد.

با توجه به مطالعات پیشین و نتایج حاصل از این مطالعه، استفاده از روش نانو حباب در تصفیه فاضلاب از جمله روش‌هایی است که می‌تواند تاثیر مثبتی برروی حذف مواد آلی، اکسیژن محلول و فلزات سنگین در فاضلاب داشته باشد. این روش باعث بهبود عملکرد تصفیه خانه‌های فاضلاب می‌شود و می‌تواند در مقیاس صنعتی و شهری استفاده شود.

۵- تشکر و قدرانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از مدیران محترم بهره‌برداری شرکت فاضلاب تهران، کارشناسان و کارگزاران ستاد نانو و

مدیرعامل محترم شرکت نانو حباب انرژی به دلیل همکاری بی‌شائبه‌شان تشکر و قدردانی نمایند.

۶- منابع

Brenner, A. 1997. Use of computers for process design analysis and control: Sequence Batch peactor, Application. Sci. tech. Vol. 35, No. 1, PP. 95-104.

Bhushan, B., Wang, Y. & Maali, A. 2008. Coalescence and movement of nanobubbles studied with tapping mode AFM and tip-bubble interaction analysis. Journal of physics: condense matter. Vol. 20, 10p.

Attard, P., Moody, M. & Tyrrel, J. 2002. Nanobubbles the picture. Physica A; Vol. 314. Issue 1-4, P. 696, 10p.

Chatlin, M. 2009. Magnetic and electric effects on water. Water structure and science. www.Isbu.ac.uk

Ducker, W. & Zhang, X. 2007. Nanobubbles exist, and are more stable than previously thought. Nanotechnology/nanophysics. www.physorg.com.

Holmberg, M., Khle, A., Mrch, K. & Boisen, A. 2003. Nanobubble trouble on gold surface. Langmuir. Vol. 19, P. 10510-10513.

H. Tsuge, Micro and nanobubbles fundamentals and applications, CRC press Taylor & Francis group, 2015.

Irvine, R. L. & Busch, A. W. 1979. Sequence batch reactors and overview. J. WPCF. Vol. 51. No. 2, PP. 235 – 243.

Lindsay, Cotton M. & Feigenbaum, B. (1984) 'Rationing by waiting lists', American Economic Review 74(3): 404-17.

Lagoon System in Marine. 2008. Choosing the right aeration system.

Lou-S., Gao. J., Xiao, X., Lix., Li, G., Zhang Y. , Li M. , Sun, J. , li. , X. & Hu J. 2002. Studies of nanobubbles produced at liquid / solid interfaces. Materials characterization. Vol. 48, P. 211-214.

Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Wastewater engineering: treatment and reuse. Boston: McGraw-Hill,

Ahmadi, M., Nabi Bidhendi, Gh., Torabian, A., Mehrdadi, N. 2018. Effects of nanobubble aeration in oxygen transfer efficiency and sludge production in wastewater biological treatment, J Adv. Environ Health Res, 6:225-233

Metcalf-Eddy, Inc. 1991. Wastewater engineering, treatment, disposal and reuse. 3eddition, Mc-Graw Hill, Inc. New York.

Otsuka, I., Yaolta, M., Higano, M. & Nagashima, S. 2003. Spontaneous formation of air nanobubbles on hydrocarbons deposited on the Au (III)/water interface. Surface review and lrtters. Vol. 10, P. 337-343.

Treybal, R.E., Mass Transfer operations, 3rd Edition, McGraw Hill, 1980.

Junkins, R., Deeny, K., Eckhoff, T. 983.The Activated Sludge Process: Fundamentals of Operation, Ann Arbor Science.

Rafael, R. T., & Robio, J. 2007. DAF-dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. Int. J. Miner. Process. 82. 1-13.

Zhang, L. & et all. 2008. Long lifetime of nanobubbles due to high inner desity. Sci china Ser G-Phys Mech Astron. Vol. 51, No. 2, PP. 219 – 224.

Marwa, S. & et all. 2021. A critical review of the recent developments in micro–nano bubbles applications for domestic and industrial wastewater treatment. Alexandria Engineering Journal Volume 61, Issue 8, August 2022, Pages 6591-6612