

تصفیه فاضلاب سنتزی به وسیله بیوراکتور هوازی - بی هوازی حاوی لجن گرانوله برای حذف مواد مغذی

ملیحه امینی^۱ حبیب اله یونسی^۲ قاسم نجف پور^۳
علی اکبر زینتی زاده لرستانی^۴ منصور انبیا^۵ محمدعلی ضیایی مدبوئی^۶

(دریافت ۹۱/۲/۱۵ پذیرش ۹۱/۱۰/۲۰)

چکیده

تجمع مواد مغذی (کربن، نیتروژن و فسفر) تخلیه شده به آبهای سطحی موجب مشکلات جدی بر خصوصیات اکولوژیکی آبها و تهدید سلامت موجودات آبی و انسانها می شود، بنابراین حذف مواد مغذی از فاضلابها قبل از تخلیه به طبیعت برای کاهش اثرات مضر ضروری است. بیوراکتور حاوی لجن گرانوله تلفیقی هوازی-بی هوازی (UAASB) برای تصفیه و حذف همزمان ترکیبات کربن، نیتروژن و فسفر کارایی بالایی دارد. در این مطالعه، درصد حذف کربن و فسفر در راکتور UAASB بررسی شد. متغیرهای مورد نظر در آزمایشها، نسبت مواد مغذی COD/N/P و میزان بارگذاری فاضلاب ورودی به سیستم بود. نتایج نشان داد که نسبت مواد مغذی $1000/250/2$ و نرخ بارگذاری مواد آلی 7 لیتر بر ساعت در زمان ماند هیدرولیکی 6 ساعت، نسبت مواد غذایی به میکروارگانیسم $0.54 \text{ kg COD/kg MLVSS.h}$ و نرخ بارگذاری مواد آلی $1.15 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{h}$ برای حذف مواد مغذی از فاضلاب در بیوراکتور بسیار مطلوب بود. در این شرایط شاخص حجمی لجن $53/12$ میلی گرم در لیتر، حذف کربن 86 درصد و کاهش فسفر $97/5$ درصد مشاهده شد. بنابراین برای دستیابی به بهترین شرایط حذف مواد مغذی، بیوراکتور UAASB با کاهش قابل ملاحظه کربن و فسفر با تنظیم مطلوب نسبت مواد مغذی ورودی به سیستم تغذیه مناسب است.

واژه‌های کلیدی: مواد مغذی، فاضلاب، بیوراکتور، لجن گرانوله، نرخ بارگذاری مواد آلی

Treatment of Synthetic Wastewater by Aerobic-anaerobic Bioreactor with Granular Sludge Developed for Removal of Nutrients

M. Amini¹ H. Younesi² Gh. Najafpour³
A. A. Zinatizadeh Lorestani⁴ M. Anbia⁵ M. A. Ziaee Modbooni⁶

(Received May 4, 2012 Accepted Jan 9, 2013)

Abstract

The excessive accumulation of nutrient (C, N, and P) discharge to surface water can pose serious ecological problems that affect the health of aquatic life and consequently that of human and animals. It is, therefore, necessary to remove these substances from wastewaters for reducing their harm to environments. A novel upflow aerobic/anoxic flocculated sludge bioreactor (UAASB) will be establish and apply as a single treatment unit for carbon, nitrogen and phosphorus removal. In this study, nutrients (C, N and P) removal efficiency in a time-based control UAASB reactor has studied. Analyze of nutrients removal efficiency were investigated from

1. Ph.D Student of Environmental Eng., Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran
2. Assoc. Prof. of Environmental Eng., Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran (Corresponding Author) (+98 122) 6253101-3 hunesi@modares.ac.ir
3. Prof. of Chemical Engineering, Mazandaran University, Babol, Iran
4. Assist. Prof. of Applied Chemistry, Faculty of Chemistry and Water and Wastewater Research Center (WWRC), Razi University, Kermanshah, Iran
5. Expert of Research Laboratory of Nanoporous Materials, Faculty of Chemistry, Iran University of Science and Technology, Tehran
6. Ph.D. Student of Plant Protection, Vali-e-asr University, Rafsanjan

- ۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور
- ۲- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، (نویسنده مسئول) ۶۲۵۳۱۰۱-۳ (+۹۸ ۱۲۲) hunesi@modares.ac.ir
- ۳- استاد گروه مهندسی شیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه مازندران، بابل
- ۴- استادیار گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی و مرکز تحقیقات آب و فاضلاب، دانشگاه رازی، کرمانشاه
- ۵- کارشناس آزمایشگاه تحقیقاتی نانو مواد مزوپروس، دانشکده شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران
- ۶- دانشجوی دکتری گروه گیاه پزشکی، دانشگاه ولیعصر، رفسنجان

wastewater using optimization of factors and effects of variables: COD/N/P ratio and flow rate. Results of experiments showed that COD/N/P ratio 1000/250/2 and Q 7 L/h in HRT 6 h, F/M 0.054 kg COD/kg MLVSS.h and OLR 0.15 kg/m³ h were desirable for removal of nutrients from wastewater in aerobic/anaerobic bioreactor. In these conditions SVI 53.12 mL/g, COD removal efficiency 86% and PO₄³⁻ removal efficiency 97.5% were showed. According all results of responses for best nutrient removal, UAASB bioreactor is desirable for removal efficiency of C and P.

Keywords: Nutrient, Wastewater, Bioreactor, Granular Sludge, Organic Loading Rate.

۱- مقدمه

بررسی سیستم تصفیه در حذف همزمان کربن و فسفر، طی فرایند نیتروژنیکاسیون و دنیتروژنیکاسیون همزمان انجام شد. این سیستم خصوصاً برای حذف مواد مغذی بسیار مناسب است و یک فناوری کلیدی برای حذف کربن آلی، نیتروژن و فسفر از فاضلابهای صنعتی و شهری است [۱۵]. در این مطالعه، تأثیر مقادیر مختلف مواد مغذی و تغییر در نسبت COD/N/P، در افزایش درصد حذف کربن و فسفر برای دستیابی به بالاترین میزان تصفیه مواد مغذی در فاضلاب بررسی شد. علاوه بر این متغیر، میزان بارگذاری فاضلاب در سیستم تصفیه نیز، در مقادیر مختلف آزمون و نتایج آن برای دستیابی به بهترین میزان حذف مواد آلی و مغذی، بررسی شد. نتایج حاصل از آزمایشها برای توسعه گرانول سازی در بیوراکتور تلفیقی برای همزمانی فرایند نیتروژنیکاسیون و دنیتروژنیکاسیون با بالاترین مقدار حذف کربن و فسفر مفید هستند.

۲- مواد و روشها

۲-۱- ترکیب فاضلاب

ترکیب فاضلاب سنتزی برای رشد لجن، شامل مواد زیر برحسب گرم در لیتر بود: ساکارز ۱، کلرید آمونیوم ۰/۹۵، پتاسیم دی هیدروژن فسفات ۰/۰۸، سولفات منیزیم ۰/۲، سولفات آهن ۰/۰۱، کلرید کلسیم ۰/۲، کربنات سدیم ۰/۰۷۳، و کربنات کلسیم ۰/۰۰۵. تمام مواد شیمیایی استفاده شده در آزمایشها دارای درجه خلوص بالا و از محصولات شرکت مرک آلمان بود.

۲-۲- کشت لجن

لجن مورد نیاز برای انجام آزمایشها، از حوضچه‌های تصفیه هوازی و بی‌هوازی در تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان نور به دست آمد. لجن در شرایط آزمایشگاهی با اتصال به پمپ هوا، به مدت یک ماه هوادهی شد تا گرانولها شکل بگیرند. لجن، در دمای اتاق کشت داده شد و نسبت مواد مغذی ناپیوسته تغییر داده شد تا در بهترین شرایط که موجب شکل‌گیری گرانول پایدار و کاهش چشم‌گیر در شاخص حجمی لجن در سیستم می‌شود، نسبت‌ها ثابت شوند. گرانول‌های شکل‌یافته با ساختار متراکم و پایدار، تقریباً کروی هستند. لجن در شرایط کاملاً تکامل یافته، قهوه‌ای رنگ است و پس از طی مراحل رشد برای شروع آزمایشها مناسب است.

برای جلوگیری از ایجاد شکوفایی جلبکی در جریان‌های آبی دریافت‌کننده، حذف مواد مغذی از فاضلابهای شهری و صنعتی به‌ویژه نیتروژن و فسفر، مورد نیاز است. حذف بیولوژیکی مواد مغذی مؤثرترین و بهترین راه از نظر هزینه برای کاهش بارگذاری مواد مغذی در حجم بالایی از فاضلاب است. با انجام نیتروژنیکاسیون هوازی و دنیتروژنیکاسیون بی‌هوازی حذف ترکیبات کربن، نیتروژن و فسفر انجام می‌شود. با تأثیر میزان اکسیژن محلول، نیتروژنیکاسیون و دنیتروژنیکاسیون همزمان صورت می‌گیرد. در لایه هوازی، باکتری‌های اتوتروف برای مصرف کربن و تبدیل کردن آمونیوم به نیترات از اکسیژن استفاده می‌کنند؛ در حالی‌که در لایه بی‌هوازی در مرکز تراکم، باکتری‌های هتروتروف تبدیل نیترات به نیتروژن گازی و ذخیره و مصرف فسفر را انجام می‌دهند [۱]. فسفر در فاضلاب به‌شکل ارتو فسفات، پلی فسفات و ترکیبات آلی فسفر دیده می‌شود. میکربها در حین سنتز سلولی و انتقال انرژی، فسفر را مصرف می‌کنند. در نتیجه ۱۰ تا ۳۰ درصد فسفر ورودی در حین تصفیه زیست‌شناختی ثانویه جداسازی می‌شود [۲]. برای اصلاح فاضلاب‌های با شدت آلودگی بالا انواع مختلف سیستم‌های هوازی و بی‌هوازی به‌کار برده شده‌اند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که فناوری گرانول‌سازی دارای توانایی بالا و قابل استفاده در اصلاح فاضلابهای آلوده همراه با سودمندی‌های فنی و اقتصادی است [۳ و ۴]. گرانول‌سازی بیولوژیکی، تجمع میکربی فشرده و متراکم شکل یافته از میکروارگانیسم‌های مختلف است. گرانول‌های بیولوژیکی، دارای خصوصیات خاص برای ایجاد توانایی بالا در حفظ و نگهداری بیومس، ساختار میکربی متراکم برای فاضلابهای حاوی مقدار بالایی مواد آلی و نرخ بارگذاری بالای مواد میکربی هستند. همچنین گرانول‌ها توانایی ته‌نشینی خوب، زمان ماند بالای بیومس و تحمل مقادیر بالای مواد سمی را دارند [۵ تا ۱۲]. گرانوله شدن، فرایندی جالب توجه در تحقیقات مهندسی و یک نوآوری در تصفیه بیولوژیکی فاضلاب‌های شهری و صنعتی است [۱۲-۵].

مطالعه حاضر در بیوراکتور UAASB^۱، با استفاده از لجن لخته‌ای هوازی-بی‌هوازی، در شرایط آزمایشگاهی، به‌منظور

^۱ Upflow Aerobic Anaerobic Sludge Bioreactor (UAASB)

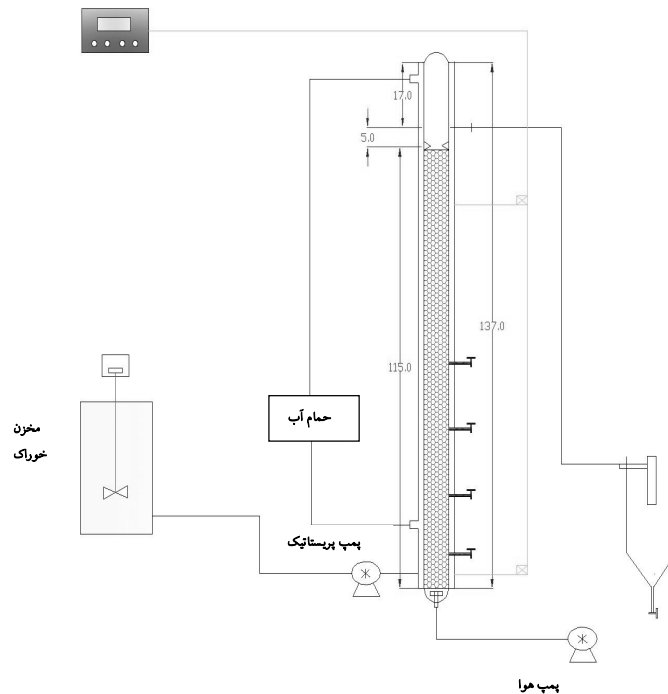
۳-۲- طراحی آزمایش‌ها

حذف همزمان کربن و فسفر، با فاضلاب سنتزی و تغییر نسبت COD/N/P و نرخ بارگذاری مواد مغذی در بیوراکتور انجام شد. مقدار کربن ورودی در تمام آزمایش‌ها، ثابت و برابر ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر بود. محدوده تغییرات نیتروژن، ۵۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ و برای فسفر، ۲، ۵ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین نرخ بارگذاری مواد ورودی در مراحل مختلف آزمایشی، ۳۲ تا ۷۸ لیتر در ساعت بود. بر اساس متغیرهای ذکر شده، ۹ سری آزمایش انجام شد و فاکتورهای مهم در فرایند تصفیه فاضلاب اندازه‌گیری شد. هر سری آزمایش‌ها، سه بار تکرار شد تا صحت داده‌های به دست آمده کاملاً مشخص شود. پارامترهای اندازه‌گیری شده در هر آزمایش ^۱ MLSS (mg/L)، ^۲ MLVSS (mg/L)، ^۳ SVI (mL/g)، درصد حذف COD (%)، درصد حذف فسفر P (%)، ^۴ HRT (h)، ^۵ OLR (kg/m³.h) و ^۶ F/M (kg COD/kg MLVSS.h) در مقادیر مختلف متغیرهای COD/N/P و ^۷ دبی بر حسب لیتر بر ساعت بود.

- 1 Mixed Liquor Suspended Solids
- 2 Mixed Liquor Volatile Suspended Solids
- 3 Sludge Volume Index
- 4 Hydraulic Retention Time
- 5 Organic Loading Rate
- 6 Food/Microorganism
- 7 Flow Rate

۴-۲- روش انجام آزمایش‌ها

حجم بیوراکتور برای تصفیه فاضلاب، ۴۷۵۰ میلی‌لیتر بود. گرانول وارد بیوراکتور شد و فاضلاب نیز با نسبت‌های مختلف مواد مغذی ساخته شده و با نرخ بارگذاری‌های مختلف وارد سیستم تصفیه می‌شد. دوره‌های متناوب هوای بی‌هوای (۱۵ دقیقه)، به‌طور خودکار توسط سیستم تکرار می‌شد. پس از انجام تصفیه فاضلاب در انتهای هر ۱۵ دقیقه، فاضلاب تصفیه شده از بخش بالای بیوراکتور خارج و در ته‌نشین‌ساز تخلیه می‌شد تا در صورت بالا بودن مواد مغذی، فاضلاب دوباره به سیستم بازگشت داده شود و در صورت عدم نیاز به تصفیه دوباره، تخلیه گردد. دوره هوادهی موجب جابه‌جایی گرانول‌ها در کل ستون بیوراکتور شد و پس از آن در دوره بی‌هوایی، ته‌نشینی گرانول‌ها صورت گرفت. تخلیه فاضلاب تصفیه شده در انتهای دوره بی‌هوایی و پس از ته‌نشینی، برای جلوگیری از خروج گرانول‌ها و جلوگیری از انسداد لوله خروجی انجام می‌شد. همه آزمایش‌ها در دمای اتاق معادل ۲۵ درجه سلسیوس انجام شد. نمونه‌ها فیلتر، و ۱۰ دقیقه با دور ۱۵۰۰۰ rpm سانتریفیوژ شدند و محلول شفاف برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. طرح شماتیک بیوراکتور مورد استفاده در سیستم پیوسته تصفیه فاضلاب در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- طرح شماتیک بیوراکتور تلفیقی هوایی/بی‌هوایی با لجن گرانوله

۲-۵- روش اندازه‌گیری ترکیبات در نمونه‌ها

در نمونه‌های فاضلاب فاکتورهای PO_4^{3-} , COD, SVI, MLSS و MLVSS با روشهای استاندارد اندازه‌گیری شد [۱۶]. دستگاه ترموراکتور برای اندازه‌گیری فاکتور COD استفاده شد [۱۷]. سنجش میزان جذب نمونه‌های COD، توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۰۰ نانومتر انجام شد [۱۸]. غلظت فسفر در طول موج ۴۰۰ نانومتر، با دستگاه اسپکتروفتومتر UV/Vis بر اساس روشهای استاندارد به دست آمد [۱۶]. شاخص حجمی لجن (SVI)، بر اساس میزان ته‌نشینی گرانول‌ها، در استوانه مدرج به مدت ۳۰ دقیقه در هر روز به دست آمد [۱۴]. مقدار اکسیژن محلول با DO متر اندازه‌گیری شد [۱۹]. pH نمونه‌ها در صورت نیاز با pH متر اندازه‌گیری شد [۲۰]. داده‌های به دست آمده حاصل از اندازه‌گیری‌های روزانه در نرم‌افزار Excel بررسی و نمودارهای مرتبط رسم شد [۲۱].

۳- نتایج و بحث

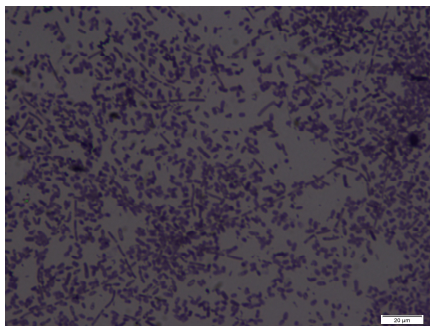
۳-۱- رشد لجن گرانوله در بیوراکتور

تجمع باکتری‌ها در رنگ آمیزی با معرف‌های متیلن بلو و گیمسا، در شکل ۲ نشان داده شده است. گرانول‌ها دارای ساختار متراکم و حاوی سلول‌های باکتریایی به مقدار زیاد و دیگر میکروارگانیسم‌ها به تعداد کمتر بودند. باکتری‌ها، شکل ظاهری میله‌ای و گرد داشتند و

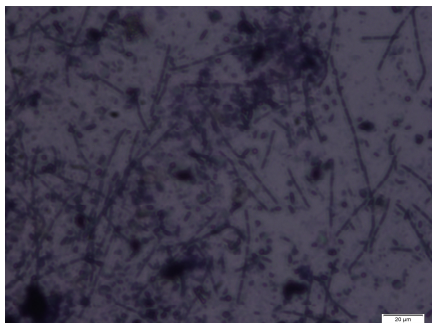
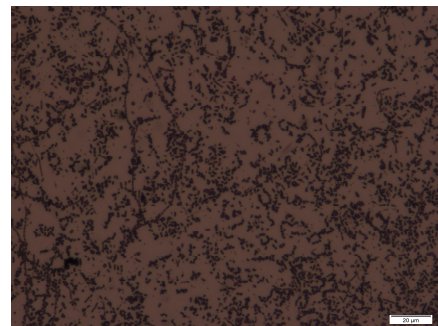
توسط سیستم شبکه‌ای به هم متصل می‌شدند. بنابراین اتصال بالای باکتری‌ها موجب پایداری گرانول‌ها و عدم از هم پاشیدگی سریع آن‌ها می‌شود. شکل ظاهری گرانول‌ها نیز، در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به ساختار ظاهری گرانول‌ها، تنها تعداد محدودی از باکتری‌ها در سطح گرانول به‌طور مستقیم در تماس با ترکیبات مغذی فاضلاب هستند و حفره‌هایی که در بخش خارجی گرانول‌ها قرار گرفته‌اند، موجب افزایش قدرت انتقال اکسیژن، کربن و مواد مغذی (نیترژن و فسفر) برای رشد و فعالیت باکتری‌های درونی گرانول‌ها و توانایی تخریب مواد سمی می‌شوند؛ بنابراین گرانول‌ها توانایی حذف همزمان کربن، نیترژن و فسفر را خواهند داشت. بزرگنمایی گرانول‌ها مطابق شکل ۲، ۲۰، ۲ نانومتر و مطابق شکل ۳ ۰/۵ تا ۰/۷ نانومتر بود.

۳-۲- بررسی مقدار فاکتورهای OLR، HRT و F/M و میزان تأثیر بر حذف مواد مغذی در تصفیه فاضلاب

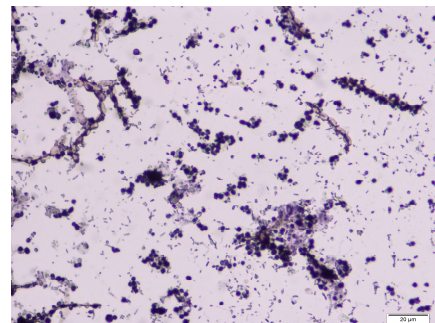
زمان ماند هیدرولیکی (HRT)، مدت زمان چرخش مواد مغذی و خروج کامل یک دوره مواد ورودی، از سیستم تصفیه در بیوراکتور است. با توجه به فرمول محاسبه مدت زمان ماند هیدرولیکی، با حجم ثابت سیستم، عامل تغییر دهنده این فاکتور، میزان بارگذاری فاضلاب به سیستم تصفیه است و دو محدوده Q برحسب لیتر در ساعت مقدار HRT را تعیین نموده است. با توجه



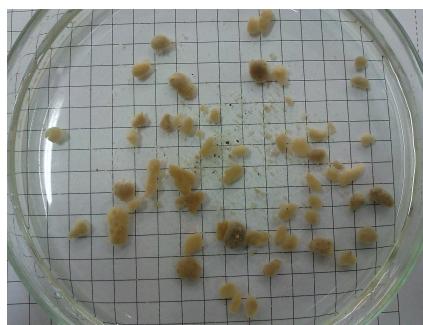
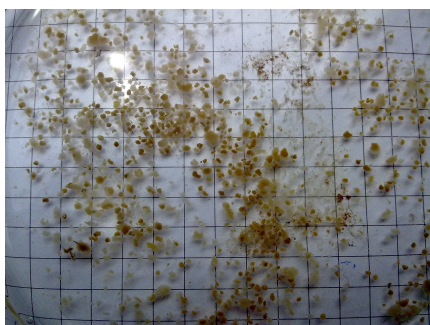
(a)



(b)



شکل ۲- اشکال باکتری‌ها در لجن گرانوله در حال رشد تحت شرایط رنگ آمیزی با متیلن بلو (a) و گیمسا (b)



شکل ۳- شکل ظاهری گرانول‌ها پس از طی مراحل رشد در شرایط هوازی/ بی‌هوازی در بیوراکتور

جدول ۱- تغییر مقدار مواد مغذی و شدت جریان مواد ورودی به بیوراکتور در جریان تصفیه فاضلاب

درصد حذف فسفر	درصد حذف COD	SVI (mL/g)	MLVSS (mg/L)	MLSS, (mg/L)	F/M (kg COD/kg MLVSS.h)	OLR, (kg/m ³ .h)	HRT (h)	COD/N/P ratio	زمان هوادهی (min/min)
۹۲/۶۲	۹۲/۸۳	۵۱/۴۴	۱۶۸۲	۲۳۲۴	۰/۰۳	۰/۰۷	۱۳/۵	۱۰۰۰/۲۵۰/۲	۷/۱۵
۶۳/۱۴	۸۷/۵۲	۱۲۵/۸۲	۲۷۱۲	۳۳۳۸	۰/۰۲۲	۰/۰۷	۱۳/۵	۱۰۰۰/۵۰/۲۰	۷/۱۵
۷۵/۸۷	۹۴/۸۸	۱۶۰/۶۳	۲۵۵۶	۲۹۲۶	۰/۰۲۳	۰/۰۷	۱۳/۵	۱۰۰۰/۲۵۰/۲۰	۷/۱۵
۹۷/۵	۸۶/۸۵	۱۳۴/۵۳	۱۵۰۸	۱۷۸۴	۰/۰۳۳	۰/۰۶	۱۵	۱۰۰۰/۳۰۰/۲	۷/۱۵
۹۵/۵۴	۸۲/۹۷	۲۶۲/۱۱	۲۲۳۸	۲۵۱۸	۰/۰۲۳	۰/۰۶	۱۵	۱۰۰۰/۲۰۰/۵	۷/۱۵
۹۷/۴۲	۸۶/۰۵	۵۳/۱۲	۲۵۵۰	۲۸۲۴	۰/۰۵۴	۰/۱۵	۶	۱۰۰۰/۲۵۰/۲	۷/۱۵
۸۶/۷۲	۸۷/۶۴	۱۶۶/۱۶	۴۰۳۲	۴۵۷۴	۰/۰۲۸	۰/۱۳	۶/۷	۱۰۰۰/۱۵۰/۲	۷/۱۵
۹۲/۳۷	۸۷/۴۹	۱۶۴/۴۹	۳۳۹۸	۳۸۳۰	۰/۰۳۳	۰/۱۳	۶/۷	۱۰۰۰/۳۰۰/۲	۷/۱۵
۹۴/۰۸	۷۸/۶۹	۳۰۰/۵۳	۲۳۵۸	۳۰۲۸	۰/۰۴۵	۰/۱۴	۶/۷	۱۰۰۰/۲۰۰/۵	۷/۱۵

حسب لیتر در ساعت است و با تغییر در دو مقدار بارگذاری مواد به بیوراکتور، نرخ بارگذاری مواد آلی نیز تغییر خواهد کرد. با توجه به جدول ۱ در نرخ بارگذاری پایین فاضلاب از ۳۲ تا ۳۵ لیتر در ساعت، نرخ بارگذاری مواد آلی ۰/۰۶ تا ۰/۰۷ کیلوگرم در مترمکعب در ساعت و در نرخ بارگذاری بالاتر، ۷۱ تا ۷۸ لیتر در ساعت، نرخ بارگذاری مواد آلی ۰/۱۳ تا ۰/۱۵ کیلوگرم در مترمکعب در ساعت، گزارش شده است. کاهش COD در هر دو نرخ بارگذاری بالاتر از ۸۰ درصد است؛ بنابراین نرخ بارگذاری مواد آلی در هر دو حالت، موجب درصد حذف بالای مواد آلی شده است. بنابراین از نرخ بارگذاری بالاتر با سرعت بیشتر حذف مواد مغذی فاضلاب استفاده می‌شود.

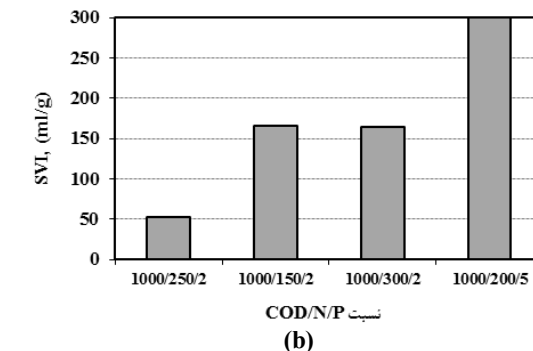
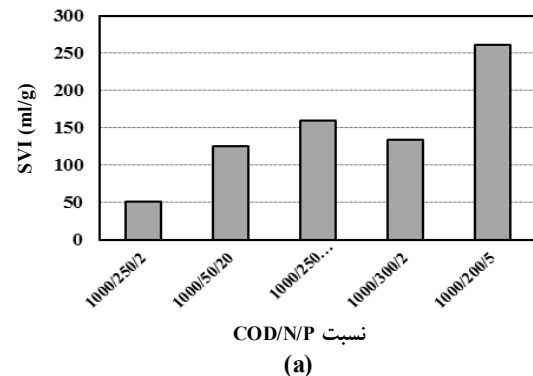
نسبت غذا به میکروارگانیسم (F/M)، مقدار مواد غذایی ورودی به سیستم، به میزان میکروارگانیسم‌های موجود در آن بر حسب kg COD/kg MLVSS.h است. عوامل تأثیرگذار بر نسبت فوق، نرخ بارگذاری مواد مغذی، حجم، مقدار لجن موجود در سیستم (معرف مقدار میکروارگانیسم‌ها در بیوراکتور) و COD ورودی هستند. مقدار لجن موجود در سیستم در حدود ۲۰۰۰ میلی‌گرم در

به داده‌های موجود در جدول ۱ در محدوده ۳۲ تا ۳۵ لیتر در ساعت، زمان ماند هیدرولیکی ۱۳/۴۶ تا ۱۵/۰۵ ساعت و در محدوده دوم ۷۱ تا ۷۸ لیتر در ساعت نیز، زمان ماند هیدرولیکی ۶/۰۷ تا ۶/۶۹ ساعت به دست آمده است. مقدار حذف مواد مغذی کربن و فسفر در جدول مورد نظر نشان می‌دهد که، در زمان ماند بالاتر مقدار تصفیه بیشتری نیز صورت می‌گیرد، اما مقدار آن در حد چند درصد و خیلی قابل توجه نیست. بنابراین اگر تفاوت زمانی حدود ۹ ساعت در این دو نرخ بارگذاری در نظر گرفته شود، برای جلوگیری از اتلاف وقت و صرف هزینه کمتر و تصفیه سریع، HRT کمتر با سرعت تصفیه بالاتر برای انجام تصفیه پیوسته در راکتور تلفیقی هوازی بی‌هوازی مطلوب خواهد بود.

نرخ بارگذاری مواد آلی (OLR)، در هر سیکل مواد مغذی فاضلاب در سیستم، بر حسب کیلوگرم در مترمکعب در ساعت است. عوامل تأثیرگذار در نرخ بارگذاری مواد آلی، مقدار منبع کربن ورودی، نرخ بارگذاری مواد در سیستم و حجم بیوراکتور است. با توجه به اینکه COD_m ($\text{kg/m}^3.\text{h}$) و V (m^3) در مطالعه حاضر ثابت هستند، بنابراین عامل تأثیرگذار نرخ بارگذاری مواد ورودی (Q) بر

لیتر ثابت بود و مقدار اضافه شده، رشد میکروارگانیسم‌ها را در حضور مواد مغذی نشان می‌دهد؛ بنابراین سه فاکتور ثابت بوده و فقط نرخ بارگذاری ورودی، متغیر و تعیین کننده نسبت مواد غذایی به میکروارگانیسم‌ها خواهد بود. F/M در نرخ بارگذاری پایین‌تر، حدود $0.02 \text{ kg COD/kg MLVSS.h}$ تا 0.03 و در نرخ بارگذاری بیشتر با نوسانات بالاتر، مقدار رشد لجن در فاصله اندازه گیری‌ها، $0.02 \text{ kg COD/kg MLVSS.h}$ تا 0.05 گزارش شده است. نرخ بارگذاری بیشتر (معادل ۷۸ لیتر در ساعت)، نسبت بالاتری را نشان می‌دهد که نشانگر عبور بیشتر مواد مغذی در سیستم است و با توجه به نسبت بهتر تصفیه در نرخ بارگذاری بالا و عدم کاهش چشم‌گیر در درصد حذف مواد مغذی با افزایش نرخ بارگذاری، بارگذاری بالاتر برای تصفیه سریع‌تر و با کیفیت و بازدهی بسیار مناسب پیشنهاد می‌شود.

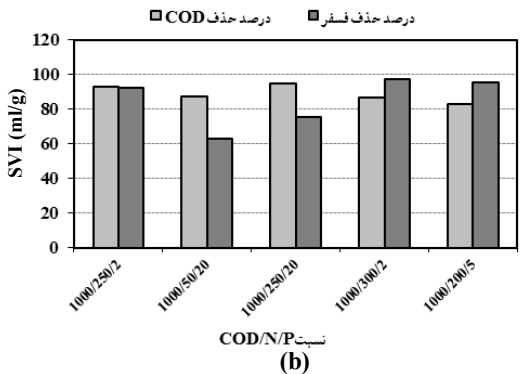
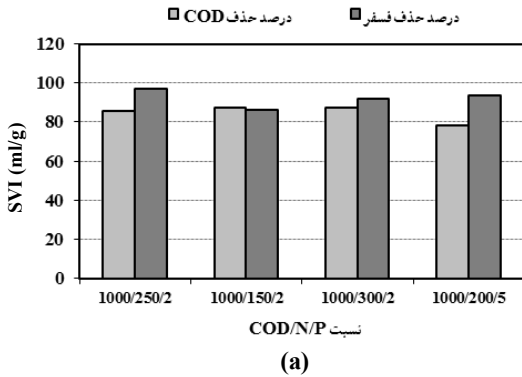
۳-۳- تعیین کمترین مقدار شاخص حجمی لجن در مقادیر مختلف مواد مغذی و بارگذاری در سیستم تصفیه بیولوژیکی فاضلاب هرچه مقدار شاخص حجمی لجن (SVI) بر حسب میلی‌لیتر در گرم کمتر باشد، گرانوله شدن مطلوب‌تر را بر حسب مقدار لجن (MLSS) نشان می‌دهد. شاخص حجمی لجن به‌طور جداگانه برای دو نرخ بارگذاری مواد مغذی ورودی بررسی شد (شکل ۴).



شکل ۴- تأثیر تغییرات مواد مغذی ورودی به بیوراکتور بر شاخص حجمی لجن، شدت جریان 0.0003 مترمکعب در ساعت (a) و شدت جریان 0.0007 مترمکعب در ساعت (b)

در بخش (a) نرخ بارگذاری ۳ لیتر در ساعت برای پنج نسبت $1000/250/2$ ، $1000/50/20$ ، $1000/250/20$ ، $1000/300/2$ و $1000/200/5$ بررسی شد. در نسبت‌های ذکر شده، شاخص حجمی لجن از ۵۱ تا ۲۶۲ میلی‌لیتر در گرم بود. کمترین مقدار در نسبت $1000/250/2$ و بیشترین مقدار در نسبت $1000/200/5$ گزارش شده است. با توجه به این که مقدار کربن در ورودی سیستم ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر ثابت در نظر گرفته شده است، بنابراین نسبت نیتروژن به فسفر در ورودی سیستم مؤثر بر شکل‌گیری گرانول‌ها و کاهش در شاخص حجمی لجن است. نسبت‌های فوق نشان می‌دهند که مقدار بالای نیتروژن به فسفر، موجب بهبود در کارایی سیستم بیوراکتور و شکل‌گیری مطلوب‌تری از گرانول‌ها می‌شود. در بخش (b) نرخ بارگذاری ۷ لیتر در ساعت برای چهار نسبت $1000/250/2$ ، $1000/150/2$ ، $1000/300/2$ و $1000/200/5$ بررسی شد. در این قسمت، شاخص حجمی لجن ۵۳ میلی‌لیتر در گرم در نسبت $1000/250/2$ تا ۳۰۰ میلی‌لیتر در گرم در نسبت $1000/200/5$ بود و مشابه قسمت (a) با نرخ بارگذاری پایین‌تر، کمترین مقدار شاخص حجمی لجن در نسبت بالای نیتروژن به فسفر در ورودی سیستم به‌دست آمد. بنابراین ضروری است که در ورودی سیستم، مقدار نیتروژن به فسفر همواره در حد بالایی نگه داشته شود تا وضعیت سیستم تصفیه مناسب گزارش شود.

شاخص حجمی لجن (SVI)، در آزمایش‌های حاضر، تا ۵۳ میلی‌لیتر در گرم کاهش داشت که بسیار پایین‌تر از مقدار این شاخص برای توده‌های لجن بی‌شکل است (بالاتر از ۱۰۰ میلی‌لیتر در گرم). در حقیقت، شرایط متغیر هوازی/بی‌هوازی، موجب بهبود در رشد و ته‌نشینی مناسب لجن انباشته و افزایش توانایی دنیتریفیکاسیون، حتی در مقادیر بالای ورود مواد مغذی به سیستم تصفیه می‌شود. بنابراین، از دیدگاه مهندسی تصفیه فاضلاب، توانایی ته‌نشینی لجن به‌طور معنی‌داری در خلال شکل‌گیری لجن‌های هوازی افزایش می‌یابد و در نتیجه موجب تجمع و بهم پیوستگی خیلی بالاتری از توده‌های لجن در ساختار سه بعدی گرانول‌ها می‌شود [۲۲]. برای رسیدن به کمترین مقادیر در شاخص حجمی لجن، مدت زمان هوادهی مطلوب (حد متوسط) مورد نیاز است [۲۳]. فعالیت باکتری‌های نیتروژن‌تجزیه‌کننده در بالای زمان هوادهی و همچنین نسبت بالای COD/N در مطالعه ژیا و همکاران تأیید شده است [۱۴]. در راکتور SBRs مورد استفاده، غلظت نیتروژن آمونیومی، مرحله به مرحله در ورودی سیستم تصفیه افزایش می‌یافت. نتایج نشان داد که، فعالیت باکتری‌های نیتروژن‌تجزیه‌کننده، به‌طور معنی‌داری با افزایش تجمع نیتروژن آمونیومی بالا می‌رود. شاخص حجمی لجن کمتر از ۲۵ میلی‌لیتر در



شکل ۵- تأثیر تغییرات مواد مغذی ورودی به بیوراکتور بر درصد حذف کربن و فسفر، شدت جریان ۰/۰۰۰۳ مترمکعب در ساعت (a) و شدت جریان ۰/۰۰۰۷ مترمکعب در ساعت (b)

زمان کوتاه‌تر آب آلوده بیشتری را تصفیه نماید. علاوه بر آن، با توجه به نامناسب بودن مقدار بالای فسفر نسبت به نیتروژن و کربن، و ایجاد اختلال در فرایند حذف، نسبت بالای نیتروژن و کربن به فسفر برای ایجاد شرایط بهینه در تصفیه فاضلاب مورد نیاز است. موارد بالا تأیید کننده نتایج گزارش شده در شکل ۴ نیز هست.

غنی‌زاده، تأثیر نسبت COD/P در بازده حذف فسفر از فاضلابهای شهری راه، در راکتور ناپیوسته متوالی، بررسی کرده است. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت COD/P از ۳۱/۴ به ۴۶/۹۹، حذف فسفر از ۵۶ درصد به ۷۱ درصد افزایش یافت [۲۶]. بنابراین سیستم SBR در بار آلی بالا، توانایی زیادی در حذف عناصر مغذی دارد، که تأیید کننده مطالعه حاضر در کارایی بالاتر سیستم در نسبت‌های بیشتر کربن به فسفر است. درصد حذف COD در مطالعه وانگ و همکاران، با استفاده از لجن فعال در شرایط هوازی بررسی شده و مقدار حذف در جریان تصفیه فاضلاب، ۹۶ درصد پس از دوره تصفیه ۲۴ ساعته بر روی لجن، به‌دست آمده است [۲۷]. در حقیقت، با افزایش زمان ماند

گرم، نشانگر مطلوبیت بسیار بالا در سیستم تصفیه است. درصد حذف نیتروژن آمونیومی نیز در حد عالی ۹۹ درصد و تقریباً با حذف تمام نیتروژن در نمونه فاضلاب همراه بوده است. دولک‌گورگن و همکاران در سال ۲۰۰۳، در سیستم SBR، شاخص حجمی لجن را کمتر از ۴۰ میلی‌لیتر در گرم همراه با دستیابی به حذف ۹۵ درصد برای کربن، ۹۹/۶ درصد فسفر و ۷۱ درصد نیتروژن به‌دست آوردند. دو برابر شدن مقدار ورودی مواد آلی به سیستم، موجب تغییرات عمده‌ای در شکل‌گیری گرانول‌ها و کاهش شاخص حجمی لجن می‌شود. زمانی که SVI شروع به کاهش نمود، ساختار لجن فعال تغییر می‌کند و از ذرات نرم و انفرادی به شکل گرانول‌های ریز تغییر می‌یابد [۲۴]. در تحقیق بلیا و کاسیدی نیز، شکل‌گیری لجن گرانوله در راکتور SBR برای تصفیه فاضلاب، صورت گرفته است. غلظت ورودی COD، ۷۶۸۵ میلی‌گرم در لیتر و فسفر کل ۲۱۷ میلی‌گرم در لیتر بود. در این آزمایش‌ها شاخص حجمی لجن ۲۲ میلی‌لیتر در گرم و میزان حذف COD و TP بالغ بر ۹۸ درصد بودند که کارایی بالای تصفیه فاضلاب را در نسبت بالای مواد مغذی در ورودی سیستم نشان می‌دهد [۲۵].

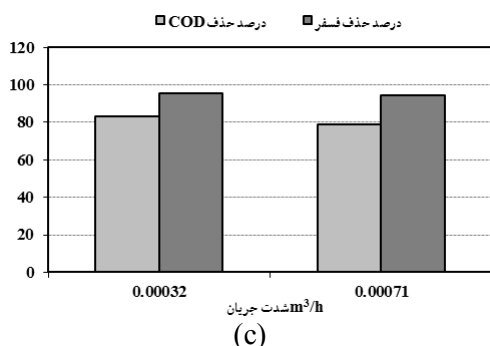
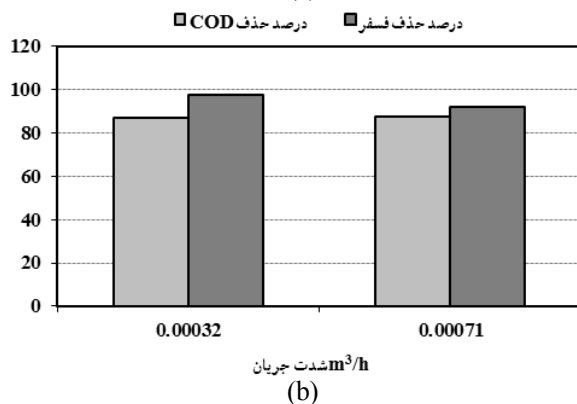
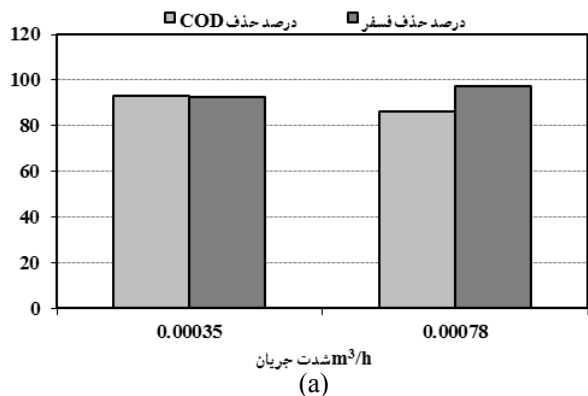
۳-۴- تعیین بالاترین درصد حذف کربن و فسفر در مقادیر مختلف مواد مغذی و بارگذاری در سیستم تصفیه بیولوژیکی فاضلاب

در مطالعه حاضر، درصد حذف کربن و فسفر اندازه‌گیری، و نتایج درصد حذف مواد مغذی در نرخ بارگذاری، ۳ و ۷ لیتر در ساعت در شکل ۵ آورده شده است. درصد حذف کربن در هر دو نرخ بارگذاری، در تمام نسبت‌ها، از ۸۰ تا ۹۵ درصد است که نتایجی بسیار مناسب در تأیید کارایی سیستم برای حذف مواد آلی است. در مورد حذف فسفر جز در دو نسبت ۱۰۰۰/۵۰/۲۰ و ۱۰۰۰/۲۵۰/۲۰ که دارای مقدار فسفر بالاتر از ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر است، حذف کم، و حدود ۶۳ و ۷۶ درصد گزارش شده است؛ در بقیه موارد درصد حذف فسفر، ۸۷ تا ۹۷/۵ درصد بود که در این مورد هم مشابه حذف کربن، کارایی بالای بیوراکتور در تصفیه فسفر تأیید می‌شود.

به‌طور کلی، در تمام نتایج مربوط به درصد حذف کربن و فسفر در مقادیر مختلف مواد مغذی، مشاهده می‌شود که در شرایط یکسان همراه با فسفر ۲ تا ۵ میلی‌گرم در لیتر، میزان حذف مواد مغذی کربن و فسفر بالای ۸۶ درصد به‌دست آمده است. بنابراین، از بین دو نرخ بارگذاری متفاوت ۳ و ۷ لیتر در ساعت، با درصد حذف بالای مواد مغذی در هر دو مورد، نرخ بارگذاری بالاتر، برای کار در سیستم تصفیه در شرایط طبیعی پیشنهاد می‌شود، تا در مدت

مرحله دنیتریفیکاسیون همراه با حذف فسفر استفاده خواهند شد. این نتایج، مشابه مطالعه حاضر است که در آن مقادیر بیشتر نسبت COD/N، برای دستیابی به درصد‌های بالای حذف فسفر در نمونه‌های فاضلاب، بسیار مطلوب‌تر است.

۳-۵- تعیین بالاترین درصد حذف کربن و فسفر با تاثیر نرخ بارگذاری مواد مغذی در سیستم تصفیه بیولوژیکی فاضلاب
درصد حذف کربن و فسفر، با تغییر نرخ بارگذاری مواد مغذی به سیستم، در دو مقدار ۳ و ۷ لیتر در ساعت، در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶- تأثیر تغییرات شدت جریان مواد مغذی ورودی به بیوراکتور بر درصد حذف کربن و فسفر، نسبت مواد مغذی ۲/۲۵۰/۱۰۰ (a)، نسبت مواد مغذی ۲/۳۰۰/۱۰۰ (b) و نسبت مواد مغذی ۵/۲۰۰/۱۰۰ (c)

هیدرولیکی داخل سیستم تصفیه فاضلاب، ترکیبات کربنی محلول، به میکروارگانیسم‌های هوازی انتقال می‌یابد و در ساختار میکروارگانیسم‌ها برای رشد و تغذیه مصرف می‌شوند و در نتیجه به مواد اولیه تبدیل خواهند شد. بنابراین موجب بهبود در درصد حذف COD و پیشرفت در کارایی سیستم می‌شود. همچنین، در مورد درصد حذف مؤثر COD، چن و همکاران، نتایجی مشابه مطالعه حاضر نشان داده‌اند [۲۸]. نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون همزمان (SND)، برای حذف مؤثر ترکیبات کربنی و نیتروژنی در راکتور بیولوژیکی چرخان^۱، استفاده شد. در سیستم مذکور حذف آمونیوم ۷۹ درصد، حذف نیتروژن کل ۷۰ درصد و حذف ترکیبات کربنی ۹۴ درصد به دست آمد. بنابراین باکتری‌ها در تعادلی پویا، برای دستیابی به درصد حذف بالایی از COD و نیتروژن بسیار مؤثر هستند. حذف بیولوژیکی فسفر از فاضلاب غنی از مواد مغذی، با استفاده از لجن گرانه‌ها، توسط ایلماز و همکاران، انجام و میزان حذف فسفر محلول، ۸۹ درصد گزارش شده است [۲۹]. اگرچه تجمع بالای جامدات معلق در خروجی فاضلاب، مانع حذف فسفر در مقادیر بالا می‌شود و حذف کل فسفر تا حد ۷۴ درصد به دست آمده است. بنابراین، فرایند مزبور برای حذف مواد مغذی بسیار مناسب است تا نیتریفیکاسیون، دنیتریفیکاسیون و حذف فسفر به نحو مطلوبی صورت گیرد. همچنین اخباری و همکاران، مدل‌سازی حذف ترکیبات مغذی در سیستم اختلاطی BC-AS را، با روش پاسخ سطحی بررسی کرده‌اند و حذف کربن و فسفر را در حد ۹۳ درصد گزارش نموده‌اند [۱۸]. حسن و همکاران نیز، بهینه‌سازی حذف COD و NH_4^+-N را از آب آشامیدنی با فیلتر بیولوژیکی انجام داده‌اند. در این تحقیق، میزان حذف ۹۵/۵ درصد COD و ۹۳/۹ درصد NH_4^+-N گزارش شده است [۳۰]. شوارتزبرگ و همکاران، تصفیه فاضلاب کارخانه لبنیات را، در راکتور ناپیوسته همراه با لجن گرانه هوازی انجام داده‌اند و تصفیه با حذف ۹۰ درصد مواد آلی و ۸۰ درصد نیتروژن را گزارش نموده‌اند [۳۱]. عملکرد سیستم تصفیه فاضلاب به روش تالاب مصنوعی در حذف فسفر، توسط سالاری و همکاران نیز، انجام شده و در خروجی سیستم ۸۶ درصد حذف فسفر گزارش شده است [۳۲]. تصفیه بیولوژیکی در فاضلاب صنایع تولید شیره خرما توسط نجف‌پور و همکاران استفاده شده است که حاوی مقدار بالایی COD در حد ۱۶۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر بوده است [۱۷]. ۸۸ درصد حذف COD، نشانگر توانایی بالایی سیستم تصفیه، در حذف مقادیر بالای آلاینده‌ها است. با افزایش نیتریفیکاسیون، کربن بیشتری مصرف می‌شود و پس از انجام این فرایند، مقدار NO_x ها در داخل محلول افزایش می‌یابد. پس از آن ترکیبات حد واسط حاوی نیتروژن، در

¹ Non-Woven Rotating Biological Contactor Reactor

فاضلاب بود. بهترین شرایط، نسبت مواد مغذی ۱۰۰۰/۲۵۰/۲ و نرخ بارگذاری ۷ لیتر در ساعت به دست آمد. در شرایط مذکور، درصد حذف مواد مغذی کربن، فسفر و شاخص حجمی لجن به ترتیب ۸۶ و ۹۷/۵ درصد و ۵۳/۱۲ میلی لیتر در گرم بودند. براساس نتایج به دست آمده، تصفیه فاضلاب در بیوراکتور حاوی لجن گرانوله، در شرایط متغیر هوای/بی-هوای، روشی بسیار مناسب برای حفاظت محیط زیست و منابع آبی از شکوفایی جلبکی است. بنابراین، فناوری مزبور در تلفیق با روشهای متداول در سیستم های تصفیه فاضلاب کاربردی و قابل استفاده است.

۵- قدردانی

تحقیق حاضر با هزینه رساله دکترا در دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. از زحمات سرکار خانم مهندس حقدوست کارشناس آزمایشگاه محیط زیست برای کمکهای عملی و از دانشگاه تربیت مدرس به منظور تأمین مالی پروژه تشکر و قدردانی می شود.

در بخش (a) نسبت مواد مغذی ۱۰۰۰/۲۵۰/۲، بخش (b) نسبت مواد مغذی ۱۰۰۰/۳۰۰/۲ و بخش (c) نسبت مواد مغذی ۱۰۰۰/۲۰۰/۵، مورد آزمایش قرار گرفت. در هر سه نمودار، حذف کربن و فسفر، به ترتیب، بالاتر از ۸۰ و ۹۰ درصد است که برای تصفیه فاضلاب بیوراکتور بسیار مطلوب است. بین دو نرخ بارگذاری در هر سه نمودار، تفاوت حذف مواد مغذی، دارای تفاوت ناچیزی است که نشانگر ارجحیت در استفاده از نرخ بارگذاری بالاتر برای غلبه بر فاکتور زمان در تصفیه فاضلاب است. بنابراین، از بین دو نرخ بارگذاری ۳ و ۷ لیتر در ساعت، نرخ بارگذاری بالاتر با صرف زمان کمتر، مطلوب تر به نظر می رسد.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، حذف همزمان کربن و فسفر در بیوراکتور حاوی لجن گرانوله، بررسی شد. متغیرهای مورد نظر در آزمایش ها، نسبت مواد مغذی COD/N/P و نرخ بارگذاری در ورودی سیستم تصفیه

۶- منابع

1. Lemaire, R., Yuan, Z., Blackall, L.L., and Crocetti, G.R. (2008). "Microbial distribution of *Accumulibacter spp.* and *Competibacter spp.* in aerobic granules from a lab-scale biological nutrient removal system." *Environmental Microbiology*, 10(2), 354-363.
2. Eddy, M., Tchobanoglous, G., Burton, F.L., and Stensel, H. D. (2002). *Wastewater engineering: Treatment and reuse*, 4th Ed., Translated by: Abrishamchi, A. Afshar, Jamshid, B., Markaze Nashre Daneshgahi Pub. and Water and Wastewater Consulting Engineers, Tehran. (In Persian)
3. Chen, Y., Jiang, W., Liang, D., and Tay, J. (2008). "Biodegradation and kinetics of aerobic granules under high organic loading rates in sequencing batch reactor." *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(2), 301-308.
4. Juang, Y.-C., Lee, D.-J., and Lai, J.-Y. (2008). "Fouling layer on hollow-fibre membrane in aerobic granule membrane bioreactor." *J. of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 39(6), 657-661.
5. Zhu, L., Xu, X., Luo, W., and Tian, Z. (2008). "A comparative study on the formation and characterization of aerobic 4-chloroaniline-degrading granules in SBR and SABR." *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(5), 867-874.
6. Wang, Q., Du, G., and Chen, J. (2004). "Aerobic granular sludge cultivated under the selective pressure as a driving force." *Process Biochemistry*, 39(5), 557-563.
7. Ivanov, V., Wang, X. H., Tay, S., and Tay, J.H. (2005). "Bioaugmentation and enhanced formation of microbial granules used in aerobic wastewater treatment." *Applied Microbiology and Biotechnology*, 70(3), 374-381.
8. Zhang, L., Chen, J. and Fang, F. (2008). "Biodegradation of methyl t-butyl ether by aerobic granules under a cosubstrate condition." *Applied Microbiology and Biotechnology*, 78(3), 543-550.
9. Sun, X.-F., Wang, S.G., Liu, X.W., and Gong, W. X. (2008). "Biosorption of malachite green from aqueous solutions onto aerobic granules: Kinetic and equilibrium studies." *Bioresource Technology*, 99(9), 3475-3483.
10. Jiang, H.-L., Tay, J. H., Liu, Y., Lee, T., and Tay, S. (2003). "Ca²⁺ augmentation for enhancement of aerobically grown microbial granules in sludge blanket reactors." *Biotechnology Letters*, 25(2), 95-99.
11. Liu, Y.-Q., and Tay, J.-H. (2007). "Characteristics and stability of aerobic granules cultivated with different starvation time." *Applied Microbiology and Biotechnology*, 75(1), 205-210.
12. Liu, Y.-Q., Tay, J.-H., and Moy, B. (2006). "Characteristics of aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor with variable aeration." *Applied Microbiology and Biotechnology*, 71(5), 761-766.

13. Adav, S.S., Lee, D. J., Show, K.Y., and Tay, J.H. (2008). "Aerobic granular sludge: Recent advances." *Biotechnology Advances*, 26(5), 411-423.
14. Xia, L.-P., Zhang, H.-M., and Wang, X.-H. (2007). "An effective way to select slow-growing nitrifying bacteria by providing a dynamic environment." *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 30(6), 383-388.
15. Aguado, D., Montaya, T., Borrás, L., Seco, A., and Ferrer, J. (2008). "Using SOM and PCA for analysing and interpreting data from a P-removal SBR." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(6), 919-930.
16. APHA. (1999). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 17th Ed., American Public Health Association, Washington, D.C.
17. Najafpour, G., Yienag, H.A., Younesi, H., and Zinatizadeh, A. (2005). "Effect of organic loading on performance of rotating biological contactors using palm oil mill effluents." *Process Biochemistry*, 40(8), 2879-2884.
18. Akhbari, A., Zinatizadeh, A.A., Mohammadi, P., Irandous, M., and Manshouri, Y. (2011). "Process modeling and analysis of biological nutrients removal in an integrated RBC-AS system using response surface methodology." *Chemical Engineering Journal*, 168(1), 269-279.
19. Shi, Y.-J., Wang, X.H., Yu, H.B., and Xie, H.J. (2011). "Aerobic granulation for nitrogen removal via nitrite in a sequencing batch reactor and the emission of nitrous oxide." *Bioresource Technology*, 102(3), 2536-2541.
20. Park, W., Jang, E., Lee, M.J., Yu, S., and Kim, T.H. (2011). "Combination of ion exchange system and biological reactors for simultaneous removal of ammonia and organics." *J. of Environmental Management*, 92(4), 1148-1153.
21. Andrade do Canto, C.S., Rodrigues, J.A.D., Ratusznei, S.M., Zaiat, M., and Foresti, E. (2008). "Feasibility of nitrification/denitrification in a sequencing batch biofilm reactor with liquid circulation applied to post-treatment." *Bioresource Technology*, 99(3), 644-654.
22. Liu, Y., and Tay, J.-H. (2004). "State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment." *Biotechnology Advances*, 22(7), 533-563.
23. Yang, Z., Zhou, S., and Sun, Y. (2008). "Start-up of simultaneous removal of ammonium and sulfate from an anaerobic ammonium oxidation (anammox) process in an anaerobic up-flow bioreactor." *J. of Hazardous Materials*, 169(1-3), 113-118.
24. Dulekgurgen, E., Ovez, S., Artan, N., and Orhon, D. (2003). "Enhanced biological phosphate removal by granular sludge in a sequencing batch reactor." *Biotechnology Letters*, 25(9), 687-693.
25. Cassidy, D.P., and Belia, E. (2005). "Nitrogen and phosphorus removal from an abattoir wastewater in a SBR with aerobic granular sludge." *Water Research*, 39(19), 4817-4823.
26. Ghanizadeh, G. (2004). "Effect of COD/N and COD/P ratio on efficiency of phosphorous and nitrogen removal from municipal wastewater by sequencing batch reactor." *J. of Environmental Studies*, 30(36), 9-14. (In Persian).
27. Wang, H., Li, Q., Wang, Y., He, N., and Sun, D. (2007). "Effect of recycling flux on performance and characteristics of activated sludge hydrolytic-aerobic recycling process in degradation of 2,4-dichlorophenol." *J. of Hazardous Materials*, 168(1), 203-209.
28. Chen, H., Liu, S., Yang, F., Xue, Y., and Wang, T. (2009). "The development of simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) process in a single reactor for nitrogen removal." *Bioresource Technology*, 100(4), 1548-1554.
29. Yilmaz, G., Lemaire, R., Keller, J., and Yuan, Z. (2008). "Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal from nutrient-rich industrial wastewater using granular sludge." *Biotechnology and Bioengineering*, 100(3), 529-541.
30. Hasan, H.A., Abdullah, S.R.S., Kamarudin, S.K., and Kofli, N.T. (2011). "Response surface methodology for optimization of simultaneous COD, NH₄⁺-N and Mn²⁺ removal from drinking water by biological aerated filter." *Desalination*, 275(1-3), 50-61.
31. Schwarzenbeck, N., Borges, J.M., and Wilderer, P.A. (2005). "Treatment of dairy effluents in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor." *Applied Microbiology and Biotechnology*, 66(6), 711-718.
32. Salari, H., Hasani, A., Borghei, M., Yazdanbakhsh, A., and Rezaei, H. (2012). "Investigation of performance wetland in removal N and P in wastewater treatment (case study: Morad Tapeh)." *J. Water and Wastewater*, 83, 40- 47. (In Persian)