

## فرآیند تصفیه در بیورآکتور حاوی لجن گرانوله تحت تاثیر زمان هوادهی و شدت جریان

- **ملیحه امینی\***: گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، صندوق پستی: ۳۶۴
- **حبیباله یونسی**: گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، صندوق پستی: ۳۵۶-۶۴۴۱۴
- **قاسم نجف پور**: گروه مهندسی شیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه مازندران، بابل، صندوق پستی: ۵۱۹
- **علی اکبر زینتی زاده لرستانی**: گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، صندوق پستی: ۱۴۵۱

تاریخ پذیرش: شهریور ۱۳۹۲

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۲

### چکیده

در این مطالعه، درصد حذف موثر کربن و فسفر در رآکتور حاوی لجن گرانوله هوازی بی هوازی بررسی شده است. متغیرهای مورد نظر در انجام آزمایشات مدت زمان هوادهی و شدت جریان مواد مغذی ورودی به سیستم بودند. نتایج نشان دادند که مدت زمان ۷ دقیقه در دوره ۱۵ دقیقه‌ای و شدت جریان ۰/۰۰۰۷ مترمکعب بر ساعت در زمان ماند هیدرولیکی ۶ ساعت، نسبت مواد غذایی به میکروارگانیسم ۰/۰۵۴ کیلوگرم COD بر (کیلوگرم MLVSS در ساعت) و شدت بارگذاری مواد آلی ۰/۱۵ کیلوگرم بر (مترمکعب در ساعت) برای حذف مواد مغذی از فاضلاب در بیورآکتور هوازی بی هوازی بسیار مطلوب بودند. در این شرایط شاخص حجمی لجن ۵۳/۱۲ میلی لیتر بر گرم، حذف کربن ۸۶٪ و کاهش موثر فسفر ۹۷/۵٪ مشاهده گردید. نتایج در مطالعه حاضر براساس میزان مطلوبیت و دست یابی به بیشترین میزان تصفیه و حذف مواد مغذی به دست آمده است بنابراین شرایطی با بیشترین درصد حذف کربن و فسفر انتخاب و گزارش شده‌اند. براساس نتایج به دست آمده از آزمایشات برای دست یابی به بهترین شرایط حذف مواد مغذی، بیورآکتور حاوی لجن گرانوله هوازی بی هوازی برای کاهش مقدار کربن و فسفر در فاضلاب‌ها با تنظیم مطلوب زمان هوادهی مناسب می باشد.

**کلمات کلیدی:** حذف مواد مغذی، فاضلاب، بیورآکتور، گرانول سازی



## مقدمه

فاضلاب تولیدی اجتماع ممکن است از سه نوع مختلف باشد: فاضلاب خانگی، فاضلاب صنعتی، آب باران. سرعت جریان فاضلاب و ترکیب آن به طور قابل ملاحظه از مکانی به مکان دیگر متفاوت و به طور کلی وابسته به وجوه اقتصادی، رفتار اجتماعی، نوع و تعداد صنایع قرار گرفته در منطقه، شرایط آب و هوایی، میزان مصرف آب و شرایط سیستم فاضلاب است (Seghezzo و همکاران، ۱۹۹۸). شکوفایی جلبیکی در اکوسیستم مرتبط با رشد جلبک و گیاه به علت تخلیه بیش از حد مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر در جریان آب‌های طبیعی به وجود می‌آید. به منظور جلوگیری از این مشکل محیط‌زیستی، محدودیت‌هایی برای تخلیه مواد آلی و مغذی خصوصاً در اکوسیستم‌های آبی حساس اعمال شده‌اند و هم‌چنین اصلاح تعداد زیادی از فاضلاب‌ها برای حذف بیولوژیکی مواد مغذی به طور گسترده و جهانی طراحی و یا به صورت بهینه‌سازی فرآیند تصفیه ارتقا یافته‌اند (Aguado و همکاران، ۲۰۰۸). مهم‌ترین هدف تصفیه فاضلاب اصلاح کیفیت آن به نحوی است که مصرف فاضلاب تصفیه شده یا دفع آن به محیط زیست بدون اشکال و بدون برهم زدن وضع اکوسیستم محیط دریافت‌کننده آن امکان‌پذیر باشد (Hosseiniان، ۲۰۰۰). فسفر یک ماده مغذی ضروری است که رشد فتوسنتزی جلبک‌ها و سیانوباکترها را تحریک می‌کند و منجر به تشدید شکوفایی جلبیکی در دریاچه‌ها می‌گردد. فاضلاب‌های شهری دارای بقایای اکسیژن بیولوژیکی (BOD) برابر ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، بقایای اکسیژن شیمیایی (COD) برابر ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، مقدار کل نیتروژن کجدالی (TKN) برابر ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر و فسفر کل برابر ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. بنابراین حذف اضافی فسفر ضرورت دارد (Rittman، ۲۰۰۶). برای دستیابی به غلظت پایین فسفر در پساب خروجی، لازم است مقادیر بالای آن در حیات و سنتز سلولی مصرف شود. جداسازی زیست‌شناختی فسفر با ایجاد شرایط محیطی مناسب در بیورآکتورها ممکن می‌شود. آزادسازی فسفر تحت شرایط بی‌اکسیژن انجام می‌شود. بدین ترتیب جداسازی کربن و فسفر زیست‌شناختی مستلزم استفاده از رآکتورهای هوازی و بی‌هوازی یا ناحیه‌های هوازی و بی‌هوازی درون یک رآکتور است (Abrishamchi و همکاران، ۲۰۰۶). امروزه بیوتکنولوژی نقش مهمی در حفظ و بهسازی محیط‌زیست دارد. بدیهی است که این روند علیرغم تغییرات سیاسی و اجتماعی آتی و پیشرفت تکنولوژی و یا به مناسبت

نیاز جوامع هم‌چنان ادامه خواهد داشت. تصفیه بیولوژیکی قادر است ترکیبات کربنی با ساختمان نسبتاً ساده و ترکیبات آمونیاکی و فسفوری را تجزیه کند (Nouri، ۲۰۱۰). رمز موفقیت در جداسازی زیست‌شناختی فسفر، قرار دادن میکروارگانیسم‌ها در معرض شرایط متناوب بی‌هوازی و هوازی است. وقتی میکروارگانیسم‌ها در معرض شرایط متناوب قرار گیرند دچار تنش می‌شوند، به طوری که جذب فسفر آن‌ها بیش‌تر از حد عادی خواهد بود. فسفر نه تنها برای نگهداری سلول، سنتز و انتقال انرژی مصرف می‌شود بلکه برای استفاده بعدی میکروارگانیسم‌ها نیز ذخیره می‌شود (Abrishamchi و همکاران، ۲۰۰۶). تصفیه در بیورآکتورها با حضور گرانول‌ها صورت می‌گیرد. گرانول‌سازی روشی جدید در بیوتکنولوژی محیط‌زیست برای اصلاح فاضلاب است. در فرآیند گرانوله‌شدن، میکروارگانیسم‌ها سلول به سلول با یک ساختار سه بعدی فرم می‌یابند (Liu و همکاران، ۲۰۰۸؛ Wang و همکاران، ۲۰۰۷؛ ۲۰۰۵). گرانول‌سازی بیولوژیکی تجمع میکروبی فشرده و متراکم شکل یافته از میکروارگانیسم‌های مختلف ثابت شده است. گرانول‌های بیولوژیکی خصوصیات خاص برای ایجاد توانایی بالا در حفظ و نگهداری بیوماس، ساختار میکروبی متراکم برای فاضلاب‌های حاوی مقدار بالای مواد آلی و مقدار بارگذاری بالای مواد میکروبی است. هم‌چنین گرانول‌ها توانایی ته‌نشینی خوب، زمان ماند بالای بیوماس و تحمل مقادیر بالای مواد سمی را دارا هستند (Adav و همکاران، ۲۰۰۸(b)؛ Adav و Lee، ۲۰۰۸(c)؛ Chen و همکاران، ۲۰۰۷؛ Hailei و همکاران، ۲۰۰۶؛ Tay و همکاران، ۲۰۰۵؛ Wang و همکاران، ۲۰۰۵(a)؛ Erguder و Demirer، ۲۰۰۵). گزارش‌هایی مبنی بر شکل‌گیری گرانول‌ها تحت شرایط متغییر هوازی بی‌هوازی وجود دارد. هم‌چنین اطلاعات ناچیزی در مورد حذف کربن و نیتروژن به وسیله گرانول‌های میکروبی تحت شرایط متغییر در دسترس هستند. بنابراین، این مطالعه بر روی توسعه لجن گرانوله در شرایط متغییر هوازی و بی‌هوازی برای تخمین میزان حذف کربن و فسفر انجام شده است (Liu و Qin، ۲۰۰۶). رآکتورهای مختلفی در حرفه مهندسی محیط‌زیست مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعه حاضر در بیورآکتور UAASB (upflow aerobic/anaerobic sludge bioreactor) با استفاده از لجن گرانوله هوازی بی‌هوازی در آزمایشگاهی به منظور بررسی سیستم تصفیه در حذف هم‌زمان کربن و فسفر طی فرآیند نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون انجام شده است.



دنیتریفیکاسیون (SND) (nitrification Simultaneous) (denitrification) با بالاترین مقدار حذف کربن و فسفر مفید هستند.

## مواد و روش‌ها

### مواد شیمیایی در فاضلاب آزمایشگاهی

فاضلاب سنتزی مورد استفاده در آزمایشات حاوی شکر به عنوان منبع کربنی، کلرید آمونیوم منبع نیتروژنی، پتاسیم دی هیدروژن فسفات منبع فسفره و همچنین عناصر ضروری و کمیاب برای رشد مطلوب لجن در طول آزمایشات و انجام مناسب فرآیند تصفیه فاضلاب بوده است. تمام مواد شیمیایی استفاده شده در آزمایشات دارای درجه خلوص خیلی بالا بودند. مواد شیمیایی مورد استفاده در جدول (۱) آمده‌اند.

جدول ۱: ترکیب فاضلاب آزمایشگاهی

CaCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Ca <sub>2</sub> Cl	FeSO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	NH <sub>4</sub> Cl	Sucrose	ترکیب
۰/۰۰۵	۰/۰۷۳	۰/۲	۰/۰۱	۰/۲	۰/۰۸	۰/۹۵	۱	مقدار (گرم بر لیتر)

اندازه‌گیری‌های روزانه اعمال می‌گردید و به‌صورت ممتد در تمام طول آزمایشات تکرار می‌شد. هم‌چنین مقدار شدت جریان مواد ورودی در مراحل مختلف آزمایشی ۰/۰۰۰۳۲ تا ۰/۰۰۱۱۳ مواد مترمکعب بر ساعت بودند. براساس متغیرهای ذکر شده ۸ سری آزمایش انجام شد و داده‌های مختلف مربوط به تمام فاکتورهای دارای اهمیت در تصفیه فاضلاب در نمونه فاضلاب پس از تصفیه بیولوژیکی در بیورآکتور حاوی لجن گرانوله در شرایط تلفیقی هوازی بی‌هوازی اندازه‌گیری شدند. هر سری آزمایشات چندین بار تکرار شدند تا صحت داده‌ها کاملاً مشخص گردد. پارامترهای اندازه‌گیری شده در هر آزمایش MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids) میلی‌گرم بر لیتر، MLVSS (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids) میلی‌گرم بر لیتر، SVI (Sludge Volume Index) میلی‌گرم بر لیتر، COD (%)، درصد حذف فسفر (Hydraulic Retention Time) HRT (ساعت)، OLR (Organic Loading Rate) کیلوگرم مترمکعب بر ساعت و F/M (Food/Microorganism) کیلوگرم COD بر کیلوگرم MLVSS در ساعت در مقادیر مختلف متغیرهای مدت زمان هوادهی (دقیقه) و شدت جریان (مترمکعب بر ساعت) بودند.

اکسیژن محلول برای آبیان مهم است و بسته به گونه‌های آبی کاهش مقدار اکسیژن محلول به کم‌تر از ۴ یا ۵ میلی‌گرم در لیتر آثار زیان‌باری در پی دارد. وجود مواد مغذی می‌تواند به پدیده شکوفایی جلبکی و کاهش اکسیژن محلول منجر شود (Abrishamchi و همکاران، ۲۰۰۶). سرعت جریان هوادهی نیز نقش مهمی را در شکل‌گیری گرانول‌ها بازی می‌کند (Sperandio، ۲۰۰۹). نقش معنی‌دار اکسیژن روی فرآیندهای هم‌زمان نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون بررسی شده‌است و غلظت پایین اکسیژن منجر به سرعت پایین نیتریفیکاسیون و سرعت بالای دنیتریفیکاسیون می‌گردد (Adav و همکاران، ۲۰۰۸(a)). این مطالعه به بررسی تاثیر مدت زمان هوادهی و شدت جریان مواد مغذی در افزایش درصد حذف کربن و فسفر برای دست‌یابی به بالاترین میزان تصفیه مواد مغذی در فاضلاب می‌پردازد. نتایج حاصل از آزمایشات برای توسعه گرانول‌سازی در بیورآکتور تلفیقی برای هم‌زمانی فرآیند نیتریفیکاسیون و

### کشت لجن

لجن مورد نیاز برای انجام آزمایشات از حوضچه‌های تصفیه هوازی و بی‌هوازی در تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک صنعتی چمستان در شهرستان نور به‌دست آمد. لجن در شرایط آزمایشگاهی با اتصال به پمپ هوا به مدت یک ماه هوادهی شد تا برای شروع آزمایشات و تشکیل لجن گرانوله در سیستم بیورآکتور آماده گردد. گرانول‌ها شکل یافته با ساختار متراکم و پایدار تقریباً کروی بودند. لجن کاملاً تکامل یافته قهوه‌ای رنگ و پس از طی مراحل رشد برای شروع آزمایشات مناسب بودند.

### طراحی آزمایشات

بررسی حذف هم‌زمان کربن و فسفر با فاضلاب آزمایشگاهی در سیستم بیورآکتور تلفیقی هوازی بی‌هوازی با لجن گرانوله انجام شد. متغیرهای مورد نظر در این مطالعه بررسی مدت زمان هوادهی و میزان شدت جریان ورودی مواد مغذی به سیستم بیورآکتور تلفیقی بودند. مقدار کربن ورودی و نسبت مواد مغذی ورودی در سیستم در تمام آزمایشات ثابت و برابر ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و ۱۰۰۰/۲۵۰/۲ بوده است. محدوده تغییرات مدت زمان هوادهی ۵، ۷، ۹ و ۱۰ دقیقه در دوره ۱۵ دقیقه‌ای بودند که به‌طور متناوب در فواصل



## روش انجام آزمایشات

حجم مفید بیورآکتور در تمام آزمایشات انجام شده برای تصفیه فاضلاب ۴۷۵۰ میلی لیتر بود (Najafpour و همکاران، ۲۰۰۶). در داخل سیستم بیورآکتور گرانول رشد داده شده در حال فعالیت بوده است و فاضلاب مورد نیاز برای تصفیه به طور روزانه در آزمایشگاه با استفاده از مواد شیمیایی ساخته شده و با شدت جریان‌های مورد آزمایش وارد سیستم تصفیه می‌گردید. دوره‌های متناوب هوازی بی‌هوازی به‌طور اتوماتیک براساس طراحی آزمایشات انجام شده توسط سیستم تکرار می‌شد. مدت زمان دوره‌های هوازی بی‌هوازی به مدت ۱۵ دقیقه بود که پشت سرهم به‌طور شبانه‌روزی تکرار می‌شدند. پس از انجام تصفیه فاضلاب توسط گرانول‌های در حال رشد طی مراحل نیتروژنیکاسیون هوازی (مصرف کربن و تبدیل ترکیبات آمونیومی به نیترات و نیتريت) و در مرحله بعد دنیتروژنیکاسیون بی‌هوازی (مصرف فسفر و تبدیل نیترات و نیتريت به نیتروژن گازی) در انتهای ۱۵ دقیقه از بخش بالای بیورآکتور خروج فاضلاب تصفیه شده به‌طور اتوماتیک انجام می‌شد و در بخش 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، به طبیعت تخلیه گردد. دوره هوادهی توسط پمپ هوا و با برقراری ارتباط شیر برقی مورد نظر صورت می‌گرفت که منجر به جابه‌جایی و پخش گرانول‌ها در کل ستون بیورآکتور می‌گردید پس از آن در دوره بی‌هوازی ته‌نشینی گرانول‌ها انجام شده و فرآیندهای تصفیه مربوط به این بخش صورت می‌گرفت. تخلیه فاضلاب تصفیه شده در انتهای دوره بی‌هوازی و پس از ته‌نشینی برای جلوگیری از خروج و هدررفت گرانول‌ها و همچنین جلوگیری از انسداد لوله خروجی صورت می‌گرفت. همه آزمایشات در دمای اتاق در حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شدند. اندازه‌گیری تمام فاکتورهای موردنظر در آزمایشات به‌طور روزانه هر صبح در ورودی و خروجی سیستم انجام و نتایج توسط نرم‌افزار صفحه گسترده Excel تحلیل شدند. برای

اندازه‌گیری فاکتورها ابتدا نمونه ورودی و خروجی در سیستم بیورآکتور از کاغذ فیلتر واتمن شماره ۴۲ با استفاده از پمپ خلاء عبور داده شدند. سپس نمونه فیلتر شده به مدت ۱۰ دقیقه در تعداد دور ۱۵۰۰۰rpm سانتریفیوژ شدند تا مواد جامد سوپانسیونی از نمونه جدا گردد و محلول کاملاً شفاف بالای لوله سانتریفیوژ برای انجام آزمایشات استفاده شد (Hermle, 236 HK, Germany). بیورآکتور آزمایشگاهی مورد استفاده در سیستم پیوسته تصفیه فاضلاب در شکل (۱) آمده است.

## روش‌های اندازه‌گیری ترکیبات در نمونه‌ها

نمونه‌های فاضلاب برای حذف ترکیبات مغذی در فاضلاب آزمایشگاهی با استفاده از لجن گرانوله در بیورآکتور تلفیقی هوازی بی‌هوازی برای فاکتورهای COD،  $PO_4^{3-}$ ، SVI، MLSS و MLVSS با استفاده از روش‌های استاندارد در کتاب American Public Health Association آنالیز شدند. دستگاه ترمورآکتور برای اندازه‌گیری فاکتور COD مورد استفاده قرار گرفت (Velp scientifica, ECO 16, Europe). دستگاه اسپکتروفتومتر (Hach, DR 2800, Germany) در طول موج ۶۰۰ نانومتر سنجش میزان جذب نمونه‌های COD را انجام داد. غلظت فاکتور فسفر در طول موج ۴۰۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر UV/Vis براساس روش‌های استاندارد به‌دست آمد (Perkin Elmer, Lambda 25, USA). شاخص حجمی لجن (SVI) براساس میزان ته‌نشینی گرانول‌ها در استوانه مدرج به مدت ۳۰ دقیقه در هر روز به‌دست آمد. مقدار اکسیژن محلول با استفاده از DO متر اندازه‌گیری شد (Multiline P<sub>4</sub>, WTW, Germany). pH نمونه‌ها در صورت نیاز با pH اندازه‌گیری شد (Jenway, 3510, UK). داده‌های به‌دست آمده حاصل از اندازه‌گیری‌های روزانه در نرم‌افزار Excel تحلیل و نمودارهای مرتبط ترسیم شدند. تمام آزمایشات فوق الذکر سال ۱۳۸۹ در آزمایشگاه محیط زیست دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس (شهرستان نور) انجام شدند.





شکل ۱: بیورآکتور آزمایشگاهی تلفیقی هوازی / بی هوازی با لجن گرانوله مورد استفاده در سیستم پیوسته تصفیه

#### محاسبه فاکتورهای مهم در تصفیه فاضلاب

به منظور دستیابی به نتایج و تصمیم‌گیری در مورد میزان تاثیرگذاری تصفیه مواد مغذی در بیورآکتور تلفیقی هوازی بی‌هوازی استفاده از فرمول‌های زیر ضروری بودند تا در مورد میزان MLSS میلی‌گرم بر لیتر، MLVSS میلی‌گرم بر لیتر، SVI میلی‌لیتر بر گرم، HRT ساعت، OLR کیلوگرم بر مترمکعب بر ساعت و F/M کیلوگرم COD بر کیلوگرم MLVSS در ساعت و بهترین مقدار متغیرها با بالاترین درصد حذف مواد مغذی تصمیم‌گیری شود. بررسی مطلوبیت هر کدام از شاخص‌های اندازه‌گیری شده براساس مقایسه با منابع علمی معتبر سنجیده شده است (Abrishamchi و همکاران، ۲۰۰۶) و Najafpour و همکاران، ۲۰۰۶ (Akhbari و همکاران، ۲۰۱۱) و با حداقل ۳ بار تکرار هر آزمایش صحت نتایج نیز تایید گردیده است.

I. اندازه‌گیری مقدار Mixed Liquor Suspended Solids در رآکتور (MLSS):

$$MLSS(mg/l) = \frac{(A - B) \times 1000}{V(ml)} \quad (1)$$

که A وزن فیلتر و بقایای خشک شده لجن (میلی‌گرم) و B وزن فیلتر (میلی‌گرم) می‌باشند.

II. اندازه‌گیری مقدار Mixed Liquor Volatile Suspended Solids در رآکتور (MLVSS):

$$MLVSS(mg/l) = \frac{(A - B) \times 1000}{V(ml)} \quad (2)$$

که A وزن بوتله چینی و بقایای مواد ثابت در نمونه

(میلی‌گرم) و B وزن بوتله چینی (میلی‌گرم) می‌باشند.

$$MLVSS(mg/l) = MLSS - MLFSS$$

III. روش اندازه‌گیری شاخص حجمی لجن (SVI):

$$SVI(ml/g) = \frac{A(ml/l) \times 1000}{B(mg/l)} \quad (3)$$

که A حجم لجن ته‌نشین شده (میلی‌لیتر بر لیتر) و B مقدار MLSS میلی‌گرم بر لیتر می‌باشند.

IV. محاسبه زمان ماند هیدرولیکی

$$HRT(h) = \frac{V(m^3)}{Q(\frac{m^3}{h})} \quad (4)$$

V. محاسبه سرعت بارگذاری مواد آلی

$$OLR(\frac{kg}{m^3 \cdot h}) = \frac{Q(\frac{m^3}{h}) \times COD_{in}(\frac{kg}{m^3})}{V(m^3)} \quad (5)$$

VI. محاسبه مقدار مواد مغذی نسبت به تعداد میکروارگانیسم‌ها

(۶)

$$\frac{F}{M}(\frac{kgCOD}{kgMLVSS \cdot h}) = \frac{Q(\frac{m^3}{h}) \times COD_{in}(\frac{kg}{m^3})}{V(m^3) \times MLVSS(\frac{kg}{m^3})}$$

#### نتایج

##### رشد لجن گرانوله در بیورآکتور

لجن مورد استفاده از تصفیه‌خانه شهرک صنعتی چمستان در شهرستان نور به مدت یک ماه متوالی هوادهی شد و پس از

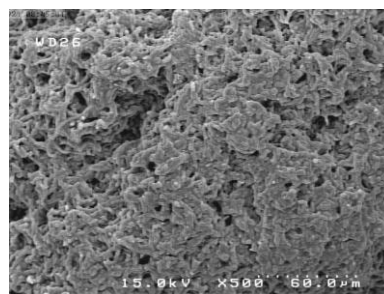


میله‌ای در عکس‌هایی با میکروسکوپ الکترونی در شکل (۲) نشان داده شده‌است.

آن برای تولید گرانول در بیورآکتور تحت شرایط متغییر هوای بی‌هوای قرار گرفت. پس از گذشت زمانی حدود دو هفته گرانول‌ها شروع به رشد نمودند. تجمع بسیار بالای باکتری‌های



(b)

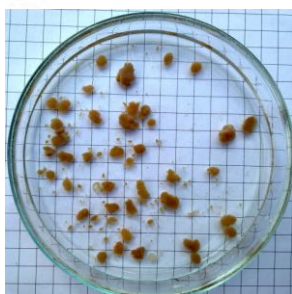


(a)

شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرانول‌ها در حال رشد با بزرگ‌نمایی ۶۰ میکرومتر (a) ، ۱۵ میکرومتر (b)

نیتروژنی را به نیترات و نیتريت انجام می‌دادند در حالی که بیش‌تر باکتری‌ها در لایه‌های داخلی شبکه باکتری‌ها قرار داشتند و به‌طور هم‌زمان با بخش هوای حذف فسفر و تبدیل نیترات و نیتريت را به نیتروژن آزاد انجام می‌دادند. حفره‌های بخش خارجی گرانول‌ها موجب افزایش قدرت انتقال اکسیژن، کربن و مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) برای رشد و فعالیت باکتری‌های درونی گرانول‌ها و توانایی تخریب مواد سمی می‌شدند. بنابراین گرانول‌ها توانایی حذف هم‌زمان کربن، نیتروژن و فسفر را داشتند.

با توجه به شکل فوق‌الذکر گرانول‌های رشد یافته در بیورآکتور با ساختار متراکم حاوی سلول‌های باکتریایی به مقدار زیاد و دیگر میکروارگانیسم‌ها به تعداد کم‌تر بودند. باکتری‌ها شکل ظاهری میله‌ای و گرد داشتند و توسط سیستم شبکه‌ای بهم متصل می‌شدند. بنابراین اتصال بالای باکتری‌ها موجب پایداری گرانول‌ها و عدم از هم پاشیدگی سریع آن‌ها می‌شد. شکل ظاهری گرانول‌ها نیز در شکل (۳) نمایش داده شده‌است. با توجه به ساختار ظاهری گرانول‌ها تنها تعداد محدودی از باکتری‌ها در سطح گرانول به‌طور مستقیم در تماس با ترکیبات مغذی فاضلاب بودند و حذف هوای کربن و تبدیل ترکیبات



شکل ۳: شکل ظاهری گرانول‌ها پس از طی مراحل رشد در شرایط هوای بی‌هوای در بیورآکتور

مانند هیدرولیکی، با حجم ثابت سیستم، عامل تغییردهنده این فاکتور شدت جریان ورود فاضلاب به سیستم تصفیه می‌باشد و دو محدوده Q برحسب مترمکعب بر ساعت مقدار HRT را تعیین نموده‌است. با توجه به داده‌های موجود در جدول (۲) در محدوده ۰/۰۰۰۳۵ مترمکعب بر ساعت زمان ماند هیدرولیکی ۱۳/۴۶ ساعت و در محدوده دوم ۰/۰۰۰۷۸

بررسی مقدار فاکتورهای HRT، OLR و F/M و میزان تاثیر بر حذف مواد مغذی در تصفیه فاضلاب HRT (Hydraulic Retention Time) مدت زمان چرخش مواد مغذی و خروج کامل یک دوره مواد ورودی از سیستم تصفیه در بیورآکتور است. با توجه به فرمول محاسبه مدت زمان



جریان مواد ورودی (Q) بر حسب مترمکعب بر ساعت است و با تغییر در دو مقدار شدت جریان ورودی مواد به سیستم بیورآکتور، مقدار بارگذاری مواد آلی نیز تغییر خواهد کرد. با توجه به جدول (۲) در شدت جریان پایین فاضلاب (۰/۰۰۳۵) مترمکعب بر ساعت) بارگذاری مواد آلی ۰/۰۶ تا ۰/۰۹ کیلوگرم بر مترمکعب بر ساعت و در شدت جریان بالاتر (۰/۰۰۷۸) - (۰/۰۱۱۳ مترمکعب بر ساعت) مقدار بارگذاری مواد آلی ۰/۱۲ تا ۰/۲۸ کیلوگرم بر مترمکعب بر ساعت گزارش شده است. با توجه به این که میانگینی از درصد کاهش COD در هر دو شدت جریان در مطالعه حاضر بالاتر از ۸۰٪ هستند. بنابراین بارگذاری مواد آلی به میزان مطلوبی در هر دو حالت همراه با حذف بالای مواد آلی بوده است. نتایج مربوط به بارگذاری مواد آلی نشانگر آن است که بهتر است از شدت جریان بالاتر البته با در نظر گرفتن بهترین میزان هوادهی در تصفیه فاضلاب استفاده شود تا با سرعت بیشتر حذف مواد مغذی فاضلاب در حد بسیار بالا و مطلوبی صورت گیرد.

۰/۰۱۱۳ مترمکعب بر ساعت نیز زمان ماند هیدرولیکی ۶/۰۷ - ۴/۲۲ ساعت به دست آمده است. مقدار حذف مواد مغذی کربن و فسفر در جدول مورد نظر نشان می دهند که در زمان ماند بالاتر مقدار تصفیه بیشتری نیز صورت می گیرد اما مقدار آن در حد چند درصد و خیلی قابل توجه نمی باشد بنابراین اگر تفاوت زمانی حدود ۹ ساعت در این دو شدت جریان در نظر گرفته شود. برای جلوگیری از اتلاف وقت و صرف هزینه کم تر با تصفیه سریع تر، HRT کم تر با سرعت تصفیه بالاتر برای انجام تصفیه پیوسته در رآکتور مطلوب تر خواهد بود.

سرعت بارگذاری (Organic Loading Rate) OLR آلی در هر دوره چرخش مواد مغذی فاضلاب در سیستم بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب بر ساعت است. عوامل تاثیرگذار در سرعت بارگذاری مواد آلی مقدار منبع کربن ورودی، شدت جریان مواد در سیستم و حجم بیورآکتور است. با توجه به این که COD<sub>in</sub> کیلوگرم بر مترمکعب بر ساعت و حجم (V) مترمکعب در مطالعه حاضر ثابت هستند بنابراین عامل تاثیرگذار شدت

جدول ۲: تغییر مدت زمان هوادهی و شدت جریان مواد ورودی به بیورآکتور در جریان تصفیه فاضلاب

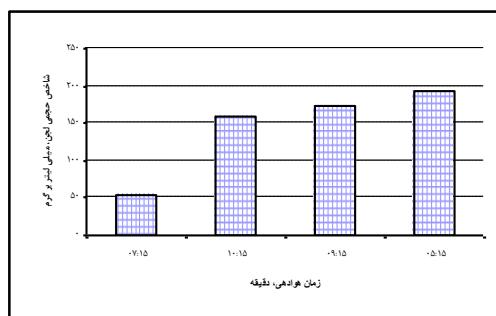
زمان هوادهی، دقیقه بر ساعت	Q مترمکعب بر ساعت	HRT ساعت	OLR کیلوگرم بر مترمکعب بر ساعت	F/M کیلوگرم COD بر کیلوگرم MLVSS در ساعت	SVI میلی لیتر بر گرم	درصد حذف COD	درصد حذف فسفر
۷ در ۱۵ دقیقه	۰/۰۰۳۵	۱۳/۴۶	۰/۰۷	۰/۰۳	۵۱/۴۴	۹۵/۴۹	۹۲/۶۲
۱۰ در ۱۵ دقیقه	۰/۰۰۳۵	۱۳/۴۶	۰/۰۶	۰/۰۱۹	۱۳۴/۵	۹۲/۸۳	۹۳/۹۱
۹ در ۱۵ دقیقه	۰/۰۰۳۵	۱۳/۴۶	۰/۰۹	۰/۰۳۸	۲۸۴/۸۴	۸۲/۵۷	۸۸/۵۷
۵ در ۱۵ دقیقه	۰/۰۰۳۵	۱۳/۴۶	۰/۰۷	۰/۰۲	۱۲۸/۲۱	۸۷/۳۲	۷۸/۸۶
۷ در ۱۵ دقیقه	۰/۰۰۷۸	۶/۰۷	۰/۱۵	۰/۰۵۴	۵۳/۱۲	۸۶/۰۵	۹۷/۴۲
۱۰ در ۱۵ دقیقه	۰/۰۰۷۸	۶/۰۷	۰/۱۵	۰/۰۳۶	۱۶۰/۱۵	۸۸/۹۹	۸۹/۸۴
۹ در ۱۵ دقیقه	۰/۰۱۱۳	۴/۲۲	۰/۲۸	۰/۱۱۹	۱۷۲/۷۱	۷۲/۲۱	۹۲/۸۱
۵ در ۱۵ دقیقه	۰/۰۰۷۸	۶/۰۷	۰/۱۲	۰/۰۵۸	۱۹۱/۹۴	۶۶/۷۷	۷۱/۵

فقط شدت جریان ورودی تا حدودی متغیر و تعیین کننده نسبت مواد غذایی به میکروارگانیسمها خواهد بود. F/M در شدت جریان پایین تر حدود ۰/۰۱۹ تا ۰/۰۳ کیلوگرم COD بر کیلوگرم MLVSS در ساعت و در شدت جریان بیشتر با نوسانات بالاتر مقدار رشد لجن در فاصله اندازه گیریها ۰/۰۳ تا ۰/۱۱ کیلوگرم COD بر کیلوگرم MLVSS در ساعت گزارش شده است. شدت جریان بیشتر مقدار نسبت بالاتری را نشان می دهد که نشانگر میزان عبور بالاتر مواد مغذی در سیستم است و با توجه به تصفیه بهتر در شدت جریان بالا و عدم

(Food/Microorganism) F/M مقدار غذایی ورودی به سیستم به نسبت میزان میکروارگانیسمهای موجود در آن بر حسب کیلوگرم COD بر کیلوگرم MLVSS در ساعت است. عوامل تاثیرگذار بر نسبت فوق الذکر شدت جریان مواد مغذی، حجم، مقدار لجن موجود در سیستم به عنوان معرف مقدار میکروارگانیسمها در بیورآکتور و COD ورودی هستند. مقدار لجن موجود در سیستم در حدود ۲۰۰۰ میلی گرم بر لیتر ثابت بوده است و مقدار اضافه شده رشد میکروارگانیسمها را در حضور مواد مغذی نشان می دهد پس سه فاکتور ثابت بوده و



در بخش (a) شدت جریان  $0.0003$  مترمکعب بر ساعت برای چهار زمان هوادهی ۵، ۷، ۹ و ۱۰ دقیقه در دوره‌های ۱۵ دقیقه‌ای بررسی شده است. در زمان‌های ذکر شده شاخص حجمی لجن از ۵۱ تا ۲۸۵ میلی‌لیتر بر گرم بوده است. کمترین مقدار در زمان ۷ دقیقه و بیشترین مقدار در ۹ دقیقه گزارش شده است. با توجه به نتایج حد وسط محدوده هوادهی بهترین مقدار گزارش شده است. بنابراین توصیه می‌شود که برای دستیابی به تصفیه مطلوب و با کارایی بالا مدت زمان هوادهی خیلی زیاد یا خیلی کم در دوره‌های هوازی بی‌هوازی اعمال نگردد تا بالاترین میزان شکل‌گیری گرانول‌ها منجر به شاخص حجمی لجن کم‌تر گردند.

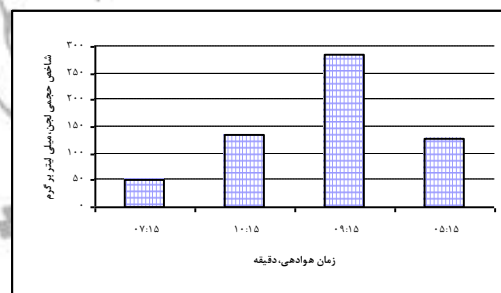


(b)

کاهش چشم‌گیر در حذف مواد مغذی با افزایش شدت جریان، مقدار جریان بالاتر برای تصفیه سریع‌تر و با بازدهی مناسب پیشنهاد می‌گردد.

#### تعیین کم‌ترین مقدار شاخص حجمی لجن در مقادیر زمان هوادهی در سیستم تصفیه بیولوژیکی فاضلاب

شاخص حجمی لجن (SVI) میزان ته‌نشینی لجن گرانوله را در مدت زمان ۳۰ دقیقه در ظرف مدرج نشان می‌دهد و هرچه مقدار این فاکتور بر حسب میلی‌لیتر بر گرم کم‌تر باشد مقدار گرانوله‌شدن مطلوب‌تر را بر حسب مقدار لجن موجود در سیستم (MLSS) نشان می‌دهد. شاخص حجمی لجن به‌طور جداگانه برای دو شدت جریان مواد مغذی ورودی بررسی شده است که در شکل (۴) قابل مشاهده می‌باشد.



(a)

شکل ۴: تاثیر تغییرات مدت زمان هوادهی بیورآکتور بر شاخص حجمی لجن، شدت جریان  $0.0003$  مترمکعب بر ساعت (a) و شدت جریان  $0.0007$  مترمکعب بر ساعت (b)

متعادل باشد و از هوادهی بیش از حد یا کمبود اکسیژن جلوگیری گردد تا تصفیه مطلوب گزارش گردد.

#### تعیین بالاترین درصد حذف کربن و فسفر در مقادیر زمان هوادهی در سیستم تصفیه بیولوژیکی فاضلاب

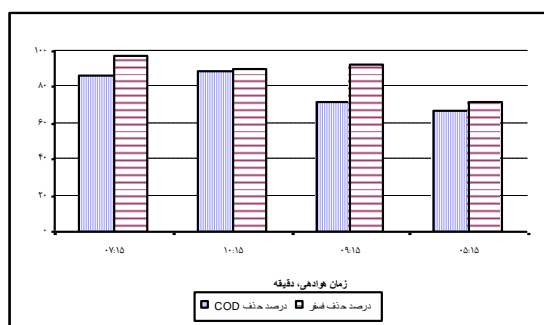
در مطالعه حاضر درصد حذف مواد کربنی و فسفره در خروجی سیستم تصفیه فاضلاب در بیورآکتور اندازه‌گیری و نتایج مقایسه درصد حذف مواد مغذی در دو شدت جریان  $0.0003$  و  $0.0007$  تا  $0.0011$  مترمکعب بر ساعت در دو بخش (a) و (b) شکل (۵) آورده شده است. درصد حذف فسفر در هر دو شدت جریان در تمام نسبت‌ها حدود  $71.5\%$  و بالاتر تا  $97.5\%$  است که به‌طور میانگین حدود  $88\%$  به‌دست آمده است و نتایج بسیار مناسب در تایید کارایی سیستم برای حذف مواد فسفره می‌باشد. در مورد مواد کربنی حذف جز در زمان هوادهی ۵ دقیقه در شدت جریان بالا که  $67\%$

در بخش (b) شدت جریان  $0.0007$  و  $0.0011$  مترمکعب بر ساعت برای چهار زمان هوادهی ۵، ۷، ۹ و ۱۰ دقیقه در دوره‌های ۱۵ دقیقه‌ای بررسی شده است. در این قسمت شاخص حجمی لجن  $53$  میلی‌لیتر بر گرم در زمان هوادهی ۷ دقیقه تا  $192$  میلی‌لیتر بر گرم در زمان هوادهی ۵ دقیقه بوده است و در تایید قسمت (a) با شدت جریان پایین‌تر، کم‌ترین مقدار شاخص حجمی لجن در حد متوسط هوادهی (۷ دقیقه در دوره‌های ۱۵ دقیقه‌ای) در سیستم به‌دست آمده است. پیرو بخش (a) که در مقدار بالای هوادهی (۹ دقیقه در دوره‌های ۱۵ دقیقه‌ای) بدترین شاخص حجمی را داشت؛ در این بخش کم‌ترین زمان هوادهی (۵ دقیقه در دوره‌های ۱۵ دقیقه‌ای) نشانگر شرایط نامناسب شکل‌گیری گرانول‌ها و شاخص حجمی لجن بالاست بنابراین ضروری است در ورودی سیستم، هوادهی

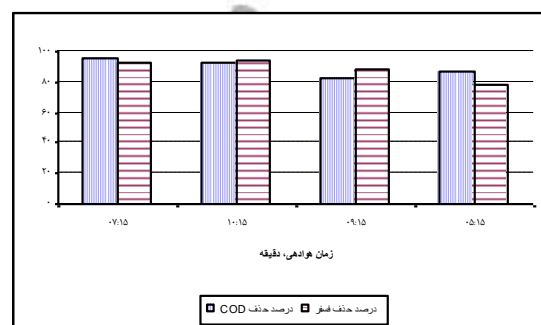




هوادهی برای دستیابی به بیشترین درصد حذف مواد مغذی در ۷ دقیقه زمان هوادهی در دوره ۱۵ دقیقه‌ای به دست آمده و درصد حذف کم‌تر مواد مغذی در دیگر زمان‌های هوادهی نشانگر عدم مطلوبیت آن‌ها می‌باشد پس ضروری است تا هوادهی در حد متوسط صورت گیرد.



(b)



(a)

شکل ۵: تاثیر تغییرات مدت زمان هوادهی بیورآکتور بر درصد حذف کربن و فسفر، شدت جریان ۰/۰۰۰۳ مترمکعب بر ساعت (a) و شدت جریان ۰/۰۰۰۷ مترمکعب بر ساعت (b)

به‌طور کلی در تمام نتایج مربوط به درصد حذف کربن و نیترژن در مقادیر مختلف زمان هوادهی مشاهده می‌شود که در شرایط یکسان با تفاوت در شدت جریان؛ درصد حذف مواد مغذی کربن و فسفر دارای اختلاف چند درصدی هستند (مقدار حذف بالاتر در شدت جریان کم‌تر مواد مغذی و زمان ماند بیش‌تر). بنابراین از بین دو شدت جریان متفاوت ۰/۰۰۰۳ و ۰/۰۰۰۷ مترمکعب بر ساعت با درصد حذف بالای مواد مغذی در هر دو مورد، شدت جریان بالاتر برای کار در سیستم تصفیه در شرایط طبیعی پیشنهاد می‌گردد تا در مدت زمان کوتاه‌تر آب آلوده بیش‌تری را تصفیه نماید. موارد فوق‌الذکر تایید کننده نتایج گزارش شده در شکل ۴ نیز می‌باشند.

**تعیین بالاترین درصد حذف کربن و فسفر با تاثیر شدت جریان مواد مغذی در سیستم تصفیه بیولوژیکی فاضلاب**

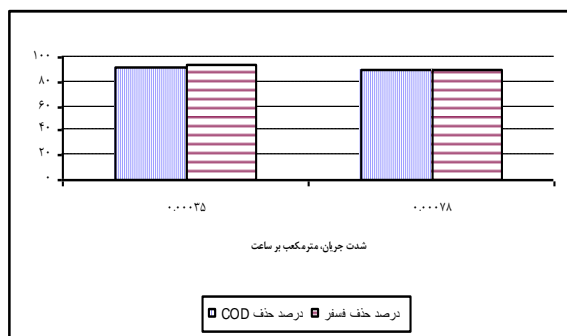
درصد حذف مواد کربنی و فسفره در خروجی سیستم تصفیه فاضلاب در بیورآکتور با در نظر گرفتن تغییرات شدت جریان ورودی مواد مغذی به سیستم بررسی و نتایج مقایسه درصد حذف مواد مغذی در دو شدت جریان ۰/۰۰۰۳ و ۰/۰۰۰۷ مترمکعب بر ساعت در بخش‌های (a) و (b) و (c) و (d) شکل (۶) آورده شده است. در بخش (a) زمان هوادهی ۷ دقیقه، بخش (b) زمان هوادهی ۱۰ دقیقه، بخش (c) زمان هوادهی ۹ دقیقه و بخش (d) زمان هوادهی ۵ دقیقه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در همه نمودارها درصد حذف ترکیبات کربن و فسفر بالاتر از ۷۰٪ و البته در مورد زمان‌های هوادهی مطلوب‌تر خیلی مناسب و حتی تا ۹۵/۵٪ و ۹۷/۵٪ به ترتیب برای کربن و فسفر هستند که خیلی خوب برای خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب بیورآکتور مورد آزمایش می‌باشند. بین دو شدت جریان مورد بررسی در هر سه نمودار تفاوت درصد حذف مواد مغذی دارای تفاوت چند درصدی می‌باشد که نشانگر ارجعیت در استفاده از شدت جریان بالاتر برای غلبه بر فاکتور زمان در تصفیه مطلوب فاضلاب در بیورآکتور گرانوله می‌باشد. بنابراین از بین دو شدت جریان ۰/۰۰۰۳ و ۰/۰۰۰۷ تا ۰/۰۰۱۱ مترمکعب بر ساعت در مطالعه حاضر، شدت جریان بالاتر با صرف زمان کم‌تر مطلوب‌تر به نظر می‌رسد.

به‌طور کلی در تمام نتایج مربوط به درصد حذف کربن و نیترژن در مقادیر مختلف زمان هوادهی مشاهده می‌شود که در شرایط یکسان با تفاوت در شدت جریان؛ درصد حذف مواد مغذی کربن و فسفر دارای اختلاف چند درصدی هستند (مقدار حذف بالاتر در شدت جریان کم‌تر مواد مغذی و زمان ماند بیش‌تر). بنابراین از بین دو شدت جریان متفاوت ۰/۰۰۰۳ و ۰/۰۰۰۷ مترمکعب بر ساعت با درصد حذف بالای مواد مغذی در هر دو مورد، شدت جریان بالاتر برای کار در سیستم تصفیه در شرایط طبیعی پیشنهاد می‌گردد تا در مدت زمان کوتاه‌تر آب آلوده بیش‌تری را تصفیه نماید. موارد فوق‌الذکر تایید کننده نتایج گزارش شده در شکل ۴ نیز می‌باشند.

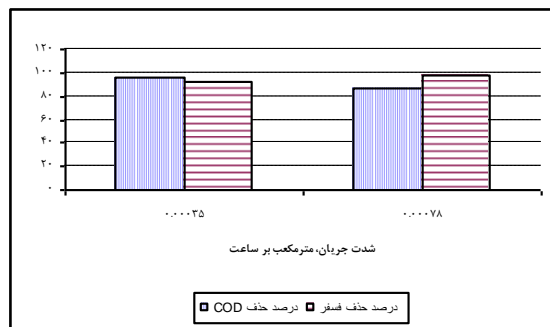
**تعیین بالاترین درصد حذف کربن و فسفر با تاثیر شدت جریان مواد مغذی در سیستم تصفیه بیولوژیکی فاضلاب**

درصد حذف مواد کربنی و فسفره در خروجی سیستم تصفیه فاضلاب در بیورآکتور با در نظر گرفتن تغییرات شدت جریان ورودی مواد مغذی به سیستم بررسی و نتایج مقایسه درصد حذف مواد مغذی در دو شدت جریان ۰/۰۰۰۳ و ۰/۰۰۰۷ مترمکعب بر ساعت در بخش‌های (a) و (b) و (c) و (d) شکل (۶) آورده شده است. در بخش (a) زمان هوادهی ۷ دقیقه، بخش (b) زمان هوادهی ۱۰ دقیقه، بخش (c) زمان هوادهی ۹ دقیقه و بخش (d) زمان هوادهی ۵ دقیقه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در همه نمودارها درصد حذف ترکیبات کربن و فسفر بالاتر از ۷۰٪ و البته در مورد زمان‌های هوادهی مطلوب‌تر خیلی مناسب و حتی تا ۹۵/۵٪ و ۹۷/۵٪ به ترتیب برای کربن و فسفر هستند که خیلی خوب برای خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب بیورآکتور مورد آزمایش می‌باشند. بین دو شدت جریان مورد بررسی در هر سه نمودار تفاوت درصد حذف مواد مغذی دارای تفاوت چند درصدی می‌باشد که نشانگر ارجعیت در استفاده از شدت جریان بالاتر برای غلبه بر فاکتور زمان در تصفیه مطلوب فاضلاب در بیورآکتور گرانوله می‌باشد. بنابراین از بین دو شدت جریان ۰/۰۰۰۳ و ۰/۰۰۰۷ تا ۰/۰۰۱۱ مترمکعب بر ساعت در مطالعه حاضر، شدت جریان بالاتر با صرف زمان کم‌تر مطلوب‌تر به نظر می‌رسد.

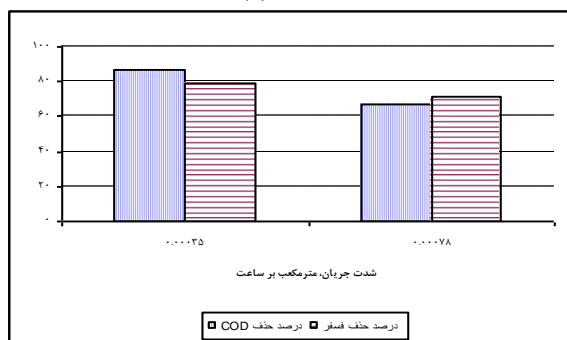




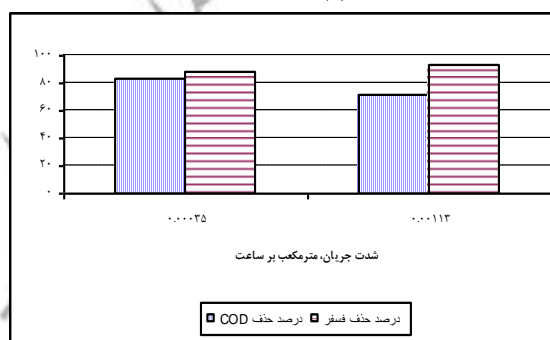
(b)



(a)



(d)



(c)

شکل ۶: تاثیر تغییرات شدت جریان مواد مغذی ورودی به بیورآکتور بر درصد حذف کربن و فسفر، زمان هوادهی ۷ دقیقه در دوره ۱۵ دقیقه‌ای (a)، زمان هوادهی ۱۰ دقیقه در دوره ۱۵ دقیقه‌ای (b) زمان هوادهی ۹ دقیقه در دوره ۱۵ دقیقه‌ای (c) زمان هوادهی ۵ دقیقه در دوره ۱۵ دقیقه‌ای (d)

## بحث

تاثیر بالای سیستم‌های بیولوژیکی در تصفیه فاضلاب ضروری هستند زیرا حجم انباشته شده لجن در سیستم بیولوژیکی حذف مواد مغذی، مشکل ساز خواهد بود (Liu و Qin, ۲۰۰۶). علاوه بر آن، انجام تصفیه در سیستم‌های پیوسته تحت تاثیر مقادیر هوادهی بالا موجب رشد و تجمع باکتری‌های هتروتروف به طور گسترده‌ای می‌گردد. در نتیجه، لجن رشد یافته در سیستم تصفیه فاضلاب متجمع تر شده، جای کمتری می‌گیرد و اکسیژن محلول کم‌تر به لایه‌های داخلی لجن انتقال می‌یابد. عمق لایه بی‌هوایی در لجن وابسته به سرعت دسترسی به اکسیژن و سرعت تهی‌سازی آن توسط میکروب‌ها می‌باشد. بنابراین نیتریفیکاسیون موقعی اتفاق می‌افتد که حامل‌های اکسیژن وجود داشته باشند و برعکس دنیتریفیکاسیون در لایه‌های عمیق‌تر لجن حادث خواهد شد؛ جایی که شرایط بی‌هوایی حاکم باشند. در چنین سیستمی شاخص حجمی لجن و SND همزمان بهبود می‌یابند (Yang و همکاران، ۲۰۰۹).

Dulekgurgen و همکاران (۲۰۰۳) نیز در آکتور ناپیوسته متوالی (SBR) شاخص حجمی لجن را کم‌تر از ۴۰ میلی‌لیتر بر گرم گزارش کردند در این حالت درصد حذف کربن،

شاخص حجمی لجن (SVI) در منابع علمی ۵۰ میلی‌لیتر بر گرم بسیار مطلوب در فرآیند تصفیه فاضلاب گزارش شده است (Abrishamchi و همکاران، ۲۰۰۶). و توانایی بالای لجن بسیار فشرده و گرانوله را در حذف مواد مغذی و آلی نشان می‌دهد و در تحقیق حاضر نیز مقدار این شاخص در شرایط مطلوب حدود ۵۳ میلی‌لیتر بر گرم است که مطلوبیت بالای نتایج را نشان می‌دهد که موجب درصد حذف بالای کربن و فسفر گردیده است. حذف مواد آلی و مغذی نیز هرچه بیشتر باشد مطلوبیت بیشتر سیستم تصفیه را نشان می‌دهد چون هر مقداری از این مواد پس از ورود به سیستم‌های آبی موجب افزایش شکوفایی جلبکی می‌گردد پس حذف کربن و فسفر به ترتیب ۸۶٪ و ۹۷/۵٪ کارایی بالای سیستم را در تصفیه فاضلاب نشان می‌دهد. تعیین کم‌ترین مقدار شاخص حجمی لجن در مقادیر زمان هوادهی در سیستم تصفیه بیولوژیکی فاضلاب

شاخص حجمی لجن به طور جداگانه برای دو شدت جریان مواد مغذی ورودی بررسی شده است که در شکل (۴) قابل مشاهده می‌باشد. گرانول‌هایی با توانایی ته‌نشینی عالی برای



نیاز هستند تا توانایی تجزیه زیستی مواد آلی را نیز به خوبی فراهم کنند (Monclus و همکاران، ۲۰۱۰). بیورآکتور ناپیوسته متوالی SBR (Sequencing Batch Reactor) تحت شرایط متغیر هوازی بی‌هوازی نیز برای حذف بیولوژیکی فسفر از نمونه‌های فاضلاب استفاده می‌شوند. در مطالعه Zhou و همکاران (۲۰۰۸) حذف فسفر ۹۴٪ نشان داد که SBR سیستمی بسیار مطلوب برای حذف بسیار بالای فسفر می‌باشد. در این مطالعه حذف هم‌زمان کربن و فسفر توسط رشد گرانول‌ها در بیورآکتور تلفیقی هوازی بی‌هوازی در شرایط آزمایشگاهی بررسی شده است. متغیرهای مورد نظر در آزمایشات مدت زمان هوادهی و شدت جریان مواد مغذی در ورودی سیستم تصفیه فاضلاب بودند. بهترین شرایط برای مدت زمان هوادهی ۷ دقیقه در دوره ۱۵ دقیقه‌ای و شدت جریان ۰/۰۰۰۷ مترمکعب بر ساعت به‌دست‌آمدند. در شرایط فوق‌الذکر درصد حذف مواد مغذی کربن، فسفر و شاخص حجمی لجن به‌ترتیب ۸۶٪، ۹۷/۵٪ و ۵۳/۱۲ میلی‌لیتربرگرم به‌دست‌آمدند. براساس نتایج به‌دست‌آمده تصفیه فاضلاب در بیورآکتور حاوی لجن گرانوله در شرایط متغیر هوازی بی‌هوازی روشی بسیار مناسب برای حفاظت محیط‌زیست و منابع آبی از شکوفایی جلبکی در اثر ازدیاد مواد مغذی می‌باشد. بنابراین تکنولوژی مذکور در تلفیق با دیگر روش‌های متداول بسیار مناسب برای سیستم‌های تصفیه فاضلاب می‌باشد.

## منابع

1. Abrishamchi, A.; Afshar, A. and Jamshid, B., 2006. Wastewater Engineering Metcalf & Eddy. Publication of Center of Academic publications. (in Persian).
2. Hosseinian, M., 2000. Anaerobic treatment in UASB. Publication of Hosseinian. (in Persian).
3. Noori, J., 2010. Biotechnology in environment. Publication of Day. (in Persian).
4. Rittman, B.A.; Maccarti, P.A.; Torkian, A. and Ahmadi, M., 2006. Biotechnology in environment. Publication of Sharif Uni. (in Persian).
5. Adav, S.S.; Lee, D.J.; Show, K.Y. and Tay, J.H., 2008. Aerobic granular sludge: Recent advances. Biotech Advances. 26:411-423.
6. Adav, S.; Lee, D.J. and Lai, J.Y., 2008. Intergeneric coaggregation of strains isolated from phenol-degrading aerobic granules. Applied Microb and Biotech. 9:657-661.

نیتروزن و فسفر به‌ترتیب ۹۵٪، ۷۱٪ و ۹۹/۶٪ بودند. با کاهش مقدار SVI ساختار توده‌های لجن فعال از اجزاء جدا از هم به حالت گرانوله تبدیل می‌شوند. بنابراین حداقل مقدار SVI در نسبت COD/N و زمان هوادهی بالا موجب گرانول‌سازی خواهد شد. حذف مطلوب مواد مغذی در هر آزمایش به‌طور عمده در مقدار بالای هوادهی به‌علت افزایش زمان هوادهی برای نیتریفیکاسیون باکتری‌های اتوتروف به دست می‌آید (Akhbari و همکاران، ۲۰۱۱). در مطالعه حاضر درصد حذف COD، N و P بالغ بر ۹۵٪ بودند که نشانگر استراتژی بسیار موثر برای تصفیه فاضلاب می‌باشد و بنابراین مقادیر بالای لجن گرانوله بهترین تصفیه مواد مغذی فاضلاب را تایید می‌کند و بنابراین روش حاضر قابل استفاده برای حذف مواد مغذی در مقدار بالای لجن در فاضلاب خواهد بود.

## تعیین بالاترین درصد حذف کربن و فسفر در مقادیر زمان هوادهی در سیستم تصفیه بیولوژیکی فاضلاب

در مطالعه حاضر درصد حذف کربن و فسفر در خروجی سیستم تصفیه فاضلاب در بیورآکتور اندازه‌گیری و نتایج مقایسه درصد حذف مواد مغذی در دو شدت جریان ۰/۰۰۰۳ و ۰/۰۰۰۷ تا ۰/۰۰۱۱ مترمکعب بر ساعت در دو بخش (a) و (b) شکل (۵) آورده شده است. Wang و همکاران (۲۰۰۸) فرآیند تصفیه را در بیورآکتور پوششی حاوی لجن گرانوله هوازی (GMBR) انجام دادند و بهترین درصد حذف مواد آلی و نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون هم‌زمان (SND) را برای نمونه‌های سنتزی در شرایط آزمایشگاهی به‌دست‌آوردند. مقدار کل درصد حذف کربن و حذف نیتروزن آمونومیوم به‌ترتیب ۸۵ تا ۹۲ درصد و ۸۵/۵ تا ۹۹/۷ درصد بودند. بنابراین نسبت COD/N در این آزمایشات حدود ۱/۵ تا ۵ و این نتایج تاییدکننده مطالعه حاضر در رابطه با بیش‌ترین مقدار حذف مواد مغذی با نسبت بالای مواد مغذی در سیستم تصفیه فاضلاب می‌باشد. افزایش در زمان هوادهی موجب کاهش در دوره بی‌هوازی می‌گردد در این صورت حذف فسفر کاهش می‌یابد علاوه بر آن در هوادهی بالا فرآیند نیتریفیکاسیون افزایش یافته و نترات تولید می‌شود. بنابراین تجمع بالای نترات نشانگر عدم انجام دنیتریفیکاسیون مناسب می‌باشد. شرایط متغیر هوازی بی‌هوازی بهترین حالت را برای میکروارگانیسم‌های تجمع‌دهنده فسفر فراهم می‌کنند (Zhang و همکاران، ۲۰۱۱). بنابراین برای دستیابی به درصدهای حذف بالای فسفر شرایط بی‌هوازی برای جذب و ذخیره فسفر مورد



18. **Qin, L. and Liu, Y., 2006.** Aerobic granulation for organic carbon and nitrogen removal in alternating aerobic-anaerobic sequencing batch reactor. *Chemosphere*.63:926-933.
19. **Seghezzi, L.; Zeeman, G.; van Lier, J.B.; Hamelers, H.V.M. and Lettinga, G., 1998.** A review: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. *Bioresource Tech*. 65:175-190.
20. **Tay, S.T.L.; Moy, B.Y.P.; Maszenan, A.M. and Tay, J.H., 2005.** Comparing activated sludge and aerobic granules as microbial inocula for phenol biodegradation. *Applied Microb and Biotech*.67:708-713.
21. **Wan, J. and Sperandio, M., 2009.** Possible role of denitrification on aerobic granular sludge formation in sequencing batch reactor. *Chemosphere*.75:220-227.
22. **Wang, Z.W.; Liu, Y. and Tay, J.H., 2005.** Distribution of EPS and cell surface hydrophobicity in aerobic granules. *Applied Microb and Biotech*.69:469-473.
23. **Wang, F.; Yang, F.I.; Zhang, X.w.; Liu, Y.H.; Zhang, H.M. and Zhou, J., 2005.** Effects of Cycle Time on Properties of Aerobic Granules in Sequencing Batch Airlift Reactors. *World Journal of Microband Biotech*.21:1379-1384.
24. **Wang, Z.W.; Liu, Y. and Tay, J.H., 2007.** Biodegradability of extracellular polymeric substances produced by aerobic granules. *Applied Microb and Biotech*.74:462-466.
25. **Wang, J.; Wang, X.; Zhao, Z. and Li, J., 2008.** Organics and nitrogen removal and sludge stability in aerobic granular sludge membrane bioreactor. *Applied Microb and Biotech*. 79:679-685.
26. **Yang, S.; Yang, F.; Fu, Z. and Lei, R., 2009.** Comparison between a moving bed membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor on organic carbon and nitrogen removal. *Bioresource Tech*.100:2369-2374.
27. **Zhang, B.; Ji, M.; Qiu, Z.; Liu, H.; Wang, J. and Li, J., 2011.** Microbial population dynamics during sludge granulation in an anaerobic-aerobic biological phosphorus removal system. *Bioresource Tech*. 102: 2474-2480.
28. **Zhou, Y.; Pijuan, M. and Yuan, Z., 2008.** Development of a 2-sludge, 3-stage system for nitrogen and phosphorus removal from nutrient-rich wastewater using granular sludge and biofilms. *Water Res*.42:3207-3217.
7. **Adav, S. and Lee, D.J., 2008.** Single-culture aerobic granules with *Acinetobacter calcoaceticus*. *Applied Microb and Biotech*.78: 551-557.
8. **Aguado, D.; Montoya, T.; Borrás, L.; Seco, A. and Ferrer, J., 2008.** Using SOM and PCA for analysing and interpreting data from a P-removal SBR. *Eng Applications of Artificial Intelligence*. 21:919-930.
9. **Akhbari, A.; Zinatizadeh, A.A.L.; Mohammadi, P.; Irandoust, M. and Mansouri, Y., 2011.** Process modeling and analysis of biological nutrients removal in an integrated RBC-AS system using response surface methodology. *Chem Eng Journal*.168: 269-279.
10. **Chen, Y.; Jiang, W.; Liang, D. and Tay, J., 2007.** Structure and stability of aerobic granules cultivated under different shear force in sequencing batch reactors. *Applied Microb and Biotech*.76:1199-1208.
11. **Dulekgurgen, E.; Ovez, S.; Artan, N. and Orhon, D., 2003.** Enhanced biological phosphate removal by granular sludge in a sequencing batch reactor. *Biotech Let*.25:687-693.
12. **Ergüder, T.H. and Demirer, G.k.N., 2005.** Investigation of granulation of a mixture of suspended anaerobic and aerobic cultures under alternating anaerobic/microaerobic/ aerobic conditions. *Process Biochem*.40:3732-3741.
13. **Hailei, W.; Guosheng, L.; Ping, L. and Feng, P., 2006.** The effect of bioaugmentation on the performance of sequencing batch reactor and sludge characteristics in the treatment process of papermaking wastewater. *Bioprocess and Biosystems Eng*.29:283-289.
14. **Li, A.j.; Yang, S.f.; Li, X.y. and Gu, J.d., 2008.** Microbial population dynamics during aerobic sludge granulation at different organic loading rates. *Water Res*.42:3552-3560.
15. **Liu, Y.Q.; Liu, Y. and Tay, J.H., 2004.** The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules. *Applied Microb and Biotech*. 65:143-148.
16. **Monclús, H.; Sipma, J.; Ferrero, G.; Comas, J. and Rodríguez-Roda, I., 2010.** Optimization of biological nutrient removal in a pilot plant UCT-MBR treating municipal wastewater during start-up. *Desalination*. 250: 592-597.
17. **Najafpour, G.; Zinatizadeh, A.A.L.; Mohamed, A.R.; Hasnain I.M. and Nasrollahzadeh, H., 2006.** High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluent in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor. *Process Biochem*. 41:370-379



## Effect of aeration time and flow rate on wastewater treatment in bioreactor with granular sludge

- **Malieh Amini\***: Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources, Jiroft University, P.O. Box: 364, Jiroft, Iran
- **Habibollah Younesi**: Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modarres University, P.O. Box: 64414-356, Noor, Iran
- **Ghasem Najafpour**: Department of Chemical Engineering, Engineering Faculty, University of Mazandaran, P.O. Box: 519, Babol, Iran
- **Ali Akbar Zinatizadeh Lorestani**: Department of Applied Chemistry, Faculty of Chemistry, Razi University, P.O. Box: 1451, Kermanshah, Iran

Received: April 2013

Accepted: August 2013

**Keywords:** Nutrient removal, Wastewater, bioreactor, Granular

### Abstract

In this study, nutrients (C and P) removal efficiency in a time-based control UAASB reactor has studied. Analyze of nutrients removal efficiency were investigated from wastewater using optimization of factors and effects of variables: Aeration time and flow rate. Results of experiments showed that Aeration time 7 min in 15 min period and  $Q$   $0.0007 \text{ m}^3/\text{h}$  in HRT 6 h, F/M  $0.054 \text{ kg COD/kg MLVSS.h}$  and OLR  $0.15 \text{ kg/m}^3\text{.h}$  were desirable for removal of nutrients from wastewater in aerobic/anaerobic bioreactor. In these conditions SVI  $53.12 \text{ ml/g}$ , COD removal efficiency 86% and  $\text{PO}_4^{3-}$  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.

