بررسی نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون هم زمان در تصفیه پساب بدون استفاده از منبع کربن خارجی در راکتور ناپیوسته متوالی

مهدی حاج سردار
تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی محیط زیست

سید مهدی برقعی*+
تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

امیرحسام حسنی
تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی محیط زیست

افشین تکدستان
اهواز، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، گروه مهندسی بهداشت محیط

چکیده: در این پژوهش، کارایی راکتور ناپیوسته متوالی (SBR) در حذف زیستی نیتروژن از پساب مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. هدف پژوهش، بررسی تأثیر یک روش مقرون به صرفه و جدید به منظور حذف ترکیب‌های نیتروژن به ویژه نیترات بوده است. روش به کار گرفته شده شامل راهبرد افزودن منبع کربن داخلی، بیش از یک بار، به راکتور بوده و نتیجه‌های به دست آمده تأثیر مستقیم و مثبت این راهکار بر تکمیل فرایند دنیتریفیکاسیون را نشان داد. این پژوهش با در نظر گرفتن زمان ماند سلولی (SRT) برابر ۲۰ روز، نسبت کربن به نیتروژن (C/N) برابر ۱۲٫۵ انجام شد. پس از برقراری شرایط پایدار، تأثیر سه بارگزاری آلی (OLR) برابر ۰٫۶۷ ، ۱ و ۱٫۵ $kg\ COD/m^3d$ بر کارایی روش انتخاب شده، مورد بررسی قرار گرفت. افزون بر آن، تأثیر سه بارگزاری نیتروژن (NLR) برابر ۰٫۰۵۴ ، ۰٫۱ و ۰٫۱۵ $kg\ N/m^3d$ نیز بر نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون هم زمان مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های به دست آمده نشان داد که در راکتور شاهد یعنی انجام عملیات با یک بار شدن راکتور در هر دوره، بازدهی حذف نیتروژن کل (TN) برابر با ٪ ۸۶٫۲۵ بود. عملکرد راکتور مورد آزمایش در دوره اول و دوم پژوهش یعنی به ترتیب با یک و دو بار افزودن منبع کربن داخلی (افزون بر پر شدن اولیه) در هر سیکل نیز بررسی شد. در این پژوهش مشخص شد که با افزایش تعداد دفعه‌های افزودن منبع کربن در هر سیکل، بازدهی حذف زیستی نیتروژن افزایش می‌یابد. بهترین عملکرد راکتور در دوره دوم و با دو بار افزودن منبع کربن داخلی به صورت آنوکسیک به دست آمد. در این شرایط با بارگزاری آلی برابر ۰٫۶۷$kg\ COD/m^3d$ و بارگزاری نیتروژن برابر ۰٫۰۵۴$kg\ N/m^3d$، بازدهی حذف نیتروژن کل برابر با ٪ ۹۱ بود. غلظت آمونیوم، نیترات و نیتریت در پساب خروجی در این حالت به ترتیب برابر ۰٫۷۲، ۵٫۹ و ۰٫۲۳ mg/L بود.

واژه‌های کلیدی: پساب مصنوعی؛ نیتریفیکاسیون؛ دنیتریفیکاسیون؛ نیتروژن؛ منبع کربن داخلی؛ راکتور ناپیوسته متوالی.

KEYWORDS: *Synthetic wastewater; Nitrification; Denitrification; Nitrogen; Internal carbon source; SBR.*

*عهده دار مکاتبات
+E-mail: mborghei@sharif.edu

مقدمه

یکی از اصلی‌ترین هدف‌های تصفیه پساب حذف مواد مغذی از آن است. مواد مغذی موجود در پساب به طور عمده شامل نیتروژن و فسفر می باشد. ورود پساب‌های دارای مقدارهای بالای نیتروژن به منابع پذیرنده مانند دریاچه‌ها و رودخانه‌ها می‌تواند مشکلاتی هم‌چون یوتریفیکاسیون را سبب شود. این پدیده می‌تواند اکسیژن محلول در منابع آب پذیرنده را پایین آورده و موجب مرگ آبزیان شود. بنا به دلیل‌های یاد شده حذف نیتروژن از پساب به عنوان یکی از انواع تصفیه پیشرفته پساب اهمیت زیادی پیدا کرده است. در این میان با وجود دیگر روش‌های حذف نیتروژن مانند اکسایش پیشرفته [۱]، حذف زیستی نیتروژن از پساب محبوبیت بیش‌تری یافته است. روش‌های زیستی افزون بر حذف نیتروژن و فسفر، موجب کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) نیز می‌شوند و می‌توانند تکمیل کننده فرایندهای تصفیه فیزیکی و شیمیایی پساب باشند [۲].

روش های زیستی حذف مواد مغذی، نسبت به روش‌های فیزیکی و شیمیایی دارای برتری‌هایی نیز هستند. به عنوان نمونه لجن دورریز کمتری تولید می‌شود و همچنین در هزینه‌های سرمایه گذاری و بهره برداری صرفه جویی می‌شود [۳].

یکی از روش های زیستی حذف نیتروژن استفاده از راکتور ناپیوسته متوالی[۱] (SBR) می باشد. این فرایند شامل ۴ مرحله پر شدن، واکنش، ته نشینی و تخلیه می باشد. در برخی موارد یک مرحله استراحت نیز در میان دو سیکل متوالی در نظر گرفته می‌شود. راکتور SBR می‌تواند میزان نیتروژن کل[۲] (TN) در پساب خروجی را به میزان چشمگیری کاهش دهد [۴].

راکتورهای ناپیوسته متوالی دارای انعطاف پذیری بالایی می‌باشند. زمانی که حذف مواد مغذی از پساب مهم باشد، استفاده از SBR اهمیت پیدا می‌کند دلیل آن هم این است که باکتری‌های نیتریفایر و دنیتریفایر به طور همزمان در یک مخزن رشد و تکثیر پیدا می کنند. رشد همزمان این ریزجانداران به سادگی و با تناوب زمان هوادهی و واکنش در راکتور با زمان‌بندی مناسب انجام می پذیرد و امکان حذف نیتروژن و فسفر به طور همزمان توسط این دو گروه از باکتری‌ها فراهم می‌شود [۵].

نیتریفیکاسیون (نیتراتزایی) و دنیتریفیکاسیون (نیتراتزدایی) دو فرایند زیستی می‌باشند که در روش‌های متعارف به منظور حذف زیستی نیتروژن به صورت پی در پی مورد استفاده قرار می‌گیرند زیرا تکمیل کننده یکدیگر می باشند. حذف زیستی نیتروژن در SBR نیز از طریق به‌کارگیری این دو فرایند هوازی و آنوکسیک انجام می پذیرد.

در اثر نیتریفیکاسیون در ابتدا آمونیوم به کمک باکتری‌های اکسید کننده آمونیوم به نیتریت تبدیل می‌شود و سپس نیتریت توسط باکتری‌های اکسید کننده نیتریت، به نیترات تبدیل می‌شود. نیتریفیکاسیون که فرایندی هوازی بوده و در آن اکسیژن پذیرنده الکترون محسوب می‌شود، توسط باکتری‌های اوتوتروف هوازی انجام می‌پذیرد. می توان نیتراتزایی را به صورت معادله‌های(۱) و (۲) بیان کرد:

$$2NH_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+ \quad (1)$$

$$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^- \quad (2)$$

واکنش اکسایش ـ کاهش کلی نیتریفیکاسیون نیز به صورت معادله (۳) قابل بیان است:

$$NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O \quad (3)$$

در فرایند دنیتریفیکاسیون، دنیتریفایرها نیترات را به گاز نیتروژن (N_2) تبدیل می‌کنند. دنیتریفیکاسیون در شرایط آنوکسیک انجام می‌شود و در آن باکتری‌های هتروتروف اختیاری نقش اصلی را بازی می‌کنند. در این فرایند نیترات پذیرنده الکترون می‌باشند و مواد آلی یا غیر آلی دهنده الکترون هستند [۶]. کاهش نیترات در فرایند دنیتریفیکاسیون توسط معادله (۴) قابل بیان است [۷]:

$$2NO_3^- + 10e^- + 12H^+ \rightarrow N_2 + 6H_2O \quad (4)$$

در یک تصفیه خانه پساب به روش SBR به منظور حذف زیستی مواد مغذی[۳] (BNR) یا به عبارتی برای تکمیل نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون، مراحل واکنش به صورت هوازی و آنوکسیک مورد نیاز می‌باشد. دراین صورت شرایط آنوکسیک برای دنیتریفیکاسیون لازم است. افزون بر آن برای حذف فسفر نیاز به ایجاد شرایط بی هوازی نیز هست. سامانه‌های متعارف لجن فعال نیازمند یک مخزن جداگانه به منظور برآورده نمودن این شرایط هستند. این در حالیست که با استفاده از راکتور SBR می توان این عمل را در یک راکتور انجام داد و با تغییر زمان بندی سیکل‌های گوناگون و همچنین تغییر تعداد سیکل‌ها در هر روز، مواد مغذی موجود در پساب خروجی را کنترل نمود [۴].

(۱) Sequencing batch reactor

(۲) Total nitrogen

(۳) Biological nutrient removal

همان‌گونه که یاد شد به منظور حذف زیستی نیتروژن در راکتور ناپیوسته متوالی نیاز به فرایند هوازی نیتریفیکاسیون و فرایند آنوکسیک دنیتریفیکاسیون آن هم به صورت متوالی هست. می‌توان این عمل را در دو مخزن هوازی و بی هوازی که به صورت متوالی قرار گرفته‌اند، انجام داد. در پژوهش حاضر شرایط انجام این دو فرایند در یک مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. قابل ذکر است در صورتی که شرایط آنوکسیک در راکتور ناپیوسته متوالی در نظر گرفته نشود، شاهد حضور نیترات در پساب خروجی از راکتور خواهیم بود. استاندارد کشور ایران ۵۰ mg/L نیترات در پساب خروجی را برای تخلیه به آب های سطحی مجاز دانسته است و برای برآورده نمودن این استاندارد، فراهم نمودن شرایط آنوکسیک (غیر هوازی)[۱] افزون بر شرایط هوازی[۲] اجتناب ناپذیر است. در این صورت می توان نیترات تولید شده در مرحله هوازی یعنی نیتریفیکاسیون را در مرحله آنوکسیک یعنی دنیتریفیکاسیون حذف نمود.

همچنین برای تکمیل دنیتریفیکاسیون در راکتور ناپیوسته متوالی باید منبع کربن مورد نیاز در اختیار ریزجاندارهای هتروتروف قرار داده شود این در حالی است که ریزجاندارهای اتوتروف می‌توانند از کربن دی اکسید به عنوان منبع کربن استفاده کنند. به طور معمول برای این منظور در عملیات تصفیه زیستی از یک منبع کربن خارجی[۳] استفاده می کنند.

منبع کربن داخلی شامل کربن موجود در خوراک ورودی و کربن تجمع یافته در سلول ریزجانداران در جریان تصفیه پساب می‌باشد حال آن‌که منبع کربن خارجی باید از خارج به سامانه تصفیه پساب افزوده شود که این موضوع موجب افزایش نیروی کار و هزینه می‌شود. منابع کربن خارجی جهت تکمیل دنیتریفیکاسیون شامل متانول، اتانول، استات، استیک اسید، گلیسیرین، ملاس و برخی فرمولاسیون‌های تجاری دیگر می‌باشد. انتخاب یکی از این منابع کربن خارجی به منظور انجام دنیتریفیکاسیون به عامل‌هایی مانند هزینه، روش حمل، سینتیک واکنش و شرایط ذخیره سازی آنها بستگی دارد [۸].

یکی از راه های افزایش بازده حذف نیتروژن پر شدن مرحله به مرحله[۴] در SBR می باشد. این روش می تواند نیتروژن کل (TN) در پساب خروجی را تا ۲ mg/L نیز کاهش دهد و بازده حذف نیتروژن را نیز تا ٪ ۹۸ نیز افزایش دهد ولی این روش به صورت مرسوم آن، نیازمند یک منبع کربن خارجی است [۹].

در پژوهش حاضر به جای استفاده از منبع کربن خارجی، از راهبرد چند بار پر شدن راکتور در شرایط آنوکسیک و در یک چرخه استفاده شد. به این ترتیب با افزودن منبع کربن داخلی، عملیات تصفیه زیستی پساب مصنوعی به منظور حذف نیتروژن به طور کامل انجام پذیرفت.

معادله (۵) نشان می دهد که بازدهی حذف نیتروژن تابعی از تعداد دفعه‌های پر شدن راکتور و نسبت کربن به نیتروژن (C/N) در خوراک ورودی است [۱۰].

$$\eta = (\gamma - (k/x)^{n-1}) / (\gamma - (k/x)^{n}) \qquad (۵)$$

در این رابطه:

η : بازدهی حذف نیتروژن (٪)

γ : ضریب کوچک تر از ۱

k : مقدار کربن مورد نیاز برای کاهش یک میلی‌گرم نیترات نیتروژن به گاز نیتروژن (mg)

x : نسبت C/N

n : تعداد دفعه‌های پر شدن راکتور

بنابراین بازدهی حذف نیتروژن با بیشتر شدن تعداد دفعه‌های پر شدن راکتور افزایش می یابد. از طرفی در یک تعداد دفعه‌های پر شدن مفروض، بازدهی حذف نیتروژن با افزایش نسبت C/N افزایش می‌یابد.

شکل‌های نیتروژن مورد بررسی در این پژوهش شامل نیتروژن کل (TN)، کجلدال نیتروژن[۵] (TKN)، آمونیوم (NH_4^+) ، نیترات (NO_3^-) و نیتریت (NO_2^-) بود. در هر مرحله با در دست داشتن بارگذاری نیتروژن[۶] (NLR) و با توجه به مقدار این پارامتر ها در پساب خروجی، راندمان حذف نیتروژن محاسبه شده و کارایی استفاده از پساب ورودی به عنوان منبع کربن داخلی بررسی شد.

بخش تجربی

راکتور ناپیوسته متوالی (SBR)

در این پژوهش از یک راکتور با ارتفاع ۷۰ سانتیمتر ، قطر ۲۴ سانتیمتر و حجم مفید ۲۸ لیتر استفاده شد. جنس این راکتور پلکسی گلس بوده و دو شیر نمونه برداری و همچنین دو شیر برقی برای تخلیه پساب

(۱) Anoxic

(۲) Aerobic

(۳) External carbon source

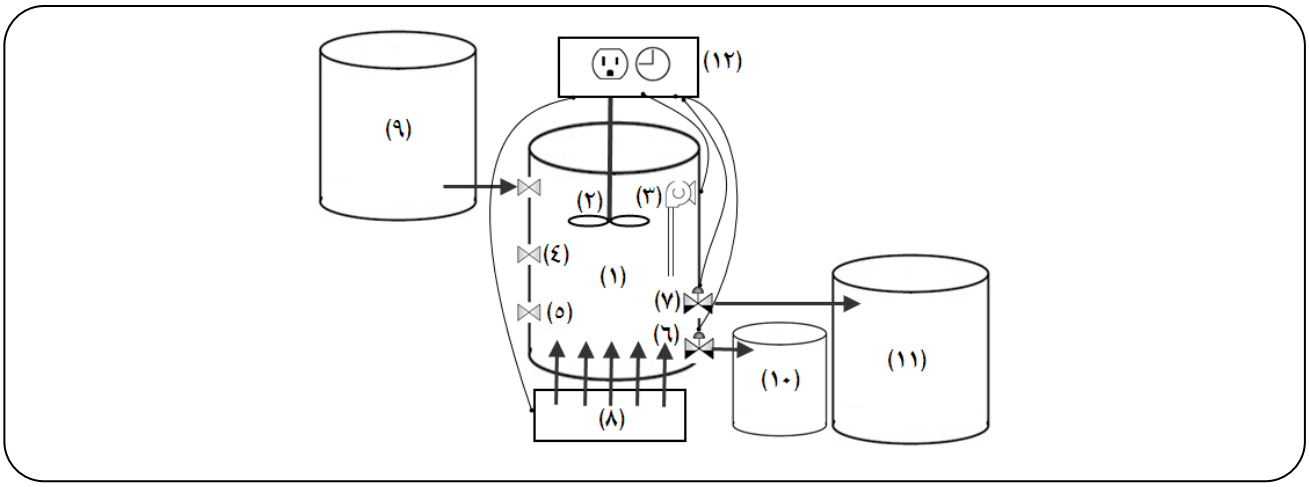
(۴) Step feeding

(۵) Total kjeldahl nitrogen

(۶) Nitrogen Loading Rate

جدول ۱ـ ویژگی‌های راکتور مورد استفاده.

نوع هوادهی	نوع اختلاط در مرحله آنوکسیک	نوع اختلاط در مرحله هوازی	حجم خوراک ورودی روزانه (لیتر)	حجم مفید (لیتر)	حجم کل (لیتر)	ارتفاع (متر)	قطر (متر)	شکل	جنس
از پایین به کمک پمپ هوا	برهم زدن توسط میکسر	بر هم زدن با حباب هوا و واتر پمپ	۱۹	۲۸	۳۱	۰/۷۰	۰/۲۴	استوانه‌ای	پلکسی گلس



شکل ۱ـ شمای واحد نیمه صنعتی مورد استفاده؛ (۱) رآکتور SBR، (۲) هم‌زن، (۳) واتر پمپ، (۴) و (۵) شیر نمونه برداری، (۶) و (۷) شیرهای برقی، (۸) پمپ هوا، (۹) مخزن خوراک ورودی، (۱۰) مخزن لجن مازاد، (۱۱) مخزن پساب خروجی، (۱۲) سامانه کنترل برقی.

و لجن در دیواره آن نصب شده بود. هوادهی این راکتور از پایین انجام شد و ورود پساب مصنوعی به راکتور به صورت وزنی صورت گرفت. اطلاعات مربوط به راکتور مورد استفاده در جدول ۱ و شمای واحد نیمه صنعتی مورد استفاده در شکل ۱ ارایه شده است.

سیستم کنترل برقی

به منظور برنامه ریزی زمانی و ایجاد سیکل های مورد نیاز در راکتور ناپیوسته متوالی (SBR)، از یک تابلو برق استفاده شد که شامل موارد زیر بود:

– سه عدد تایمر آنالوگ ذخیره‌ای Theben ساخت کشور آلمان

– یک عدد کنتاکتور Schneider ساخت کشور فرانسه

– دو عدد رله شیشه ای ساخت اروپا

– سه عدد فیوز مینیاتوری

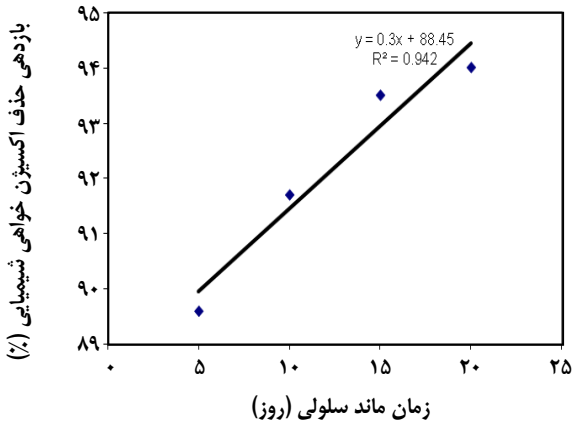
با استفاده از این تابلوی کنترل، زمان بندی مورد نظر برای مراحل ۴ گانه راکتور ناپیوسته متوالی شامل پر شدن، واکنش، ته نشینی و تخلیه در بازه های مورد نظر پژوهش برآورده شد و این مراحل به صورت خودکار انجام شدند. افزون بر آن، کنترل عملکرد پمپ هوا و واتر پمپ نیز از طریق این تابلوی کنترل انجام پذیرفت.

راه اندازی واحد نیمه صنعتی

برای راه اندازی اولیه واحد نیمه صنعتی، از بذر لجن فعال برگشتی تصفیه‌خانه پساب چنیبه اهواز استفاده شد. به این ترتیب که در روزهای ابتدایی پژوهش با افزودن پساب مصنوعی حجم مورد نیاز پساب در راکتور تأمین شد. در مدت زمان راه اندازی اولیه COD و TSS پساب خروجی به صورت روزانه اندزه گیری شد و پس از ایجاد شرایط جریان پایدار[۱] مرحله اصلی پژوهش آغاز شد. در این هنگام اندازه گیری پارامتر های مورد نظر پژوهشگران مانند غلظت نیتروژن در ورودی(TN) و خروجی، سن لجن، تأثیر بارگزاری آلی[۲] بر روی راندمان تصفیه مورد بررسی گرفت. برای آغاز به کار راکتور، در ابتدا باید میکروارگانیسم ها با شرایط جدید سازگار شوند [۱۱].

(۱) Steady state flow

(۲) Organic loading rate



شکل ۲ـ رابطه درصد حذف COD و زمان ماند سلولی.

مدت زمان مورد نیاز برای سازگاری میکروارگانیسم ها با شرایط محیطی ۱۸روز بود و پس از این مدت میکروارگانیسم ها در فاز ثابت رشد قرار گرفتند. برای انجام فرایندهای زیستی تصفیه می توان از محیط کشت خالص و یا ترکیبی میکروارگانیسم ها بهره برد [۱۲]. در این پژوهش از محیط کشت ترکیبی میکروارگانیسم ها استفاده شده است. در این هنگام بارگزاری ابتدایی مورد نظر یعنی ۰٫۶۷ kg COD/m^3d ایجاد شد و با تنظیم غلظت جامدهای معلق مایع مخلوط[۱] (MLSS) و همچنین غلظت لجن دور ریز، زمان ماند سلولی[۲] (SRT) برابر ۲۰ روز در نظر گرفته شد. معیار رسیدن به شرایط پایدار در راکتور در این پژوهش، COD پساب خروجی از راکتور بود. شکل ۲ رابطه میان زمان ماند سلولی و درصد حذف COD را نشان می دهد.

زمان بندی سیکل راکتور

در این پژوهش بررسی اثر پر شدن چندگانه راکتور در سه بازه زمانی گوناگون مورد بررسی قرار گرفت. در هر بازه زمانی تعداد دفعه‌های افزودن منبع کربن متفاوت انتخاب شد و اثر این تغییر بر بازدهی حذف نیتروژن مورد بررسی قرار گرفت. هر سیکل راکتور ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد و زمان بندی مورد نظر با به کار گیری تابلو برق انجام پذیرفت. شایان ذکر است که در مرحله آنوکسیک واکنش، اختلاط کامل راکتور به کمک یک میکسر که تحت فرمان تابلو کنترل برقی بود، تأمین شد. در فاز هوازی نیز یک پمپ محتویات راکتور را از قسمت بالایی راکتور به قسمت پایین باز می‌گرداند و در نتیجه به کمک واترپمپ و پمپ هواده، خوراک ورودی درون راکتور به طور کامل همگن شد. در پژوهش حاضر راکتور شاهد، تنها یک بار پر شد ولی راکتور آزمایش در دو دوره گوناگون مورد بررسی قرار گرفت. در دوره اول پس از پر شدن اولیه راکتور، خوراک یک بار دیگر نیز به عنوان تأمین کننده منبع کربن داخلی به راکتور افزوده شد. این منبع کربن برای انجام کامل عملیات دنیتریفیکاسیون مورد نیاز بود. در دوره دوم، منبع کربن داخلی دو بار به راکتور افزوده شد. شکل ۳ سیکل راکتور با یک بار پر شدن را نشان می دهد. زمان بندی سیکل راکتورهای شاهد و آزمایش به صورت ارایه شده در جدول ۲ بود.

روش های آزمایش ها

آزمایش های انجام شده مطابق با کتاب روش های استاندارد آزمایش‌های آب و پساب [۱۳] انجام پذیرفت. پارامترهایی که بر این اساس اندازه گیری شده اند، TSS ، MLSS و COD می‌باشند. به منظور اندازه‌گیری برخی از شکل‌های نیتروژن شامل نیترات، نیتریت و آمونیوم از دستگاه اسپکتروفتومتر شرکت Hach مدل DR5000 استفاده شد و برای هر یک از این پارمترها از پودرهای واکنش‌گر مورد نیاز بیان شده در کاتالوگ این دستگاه استفاده شد. اندازه گیری TKN در این پژوهش با استفاده از ست دستگاه‌های کجلدال شرکت Behr و با روش هضم انجام پذیرفت. اندازه گیری اکسیژن محلول[۳] (DO) و pH به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های قابل حمل شرکت‌های WTW و HANNA انجام گرفت. اندازه‌گیری پتانسیل اکسایش ـ کاهش[۴] (ORP) نیز توسط دستگاه قابل حمل شرکت EUTECH مدل ORPTestr 10 صورت گرفت.

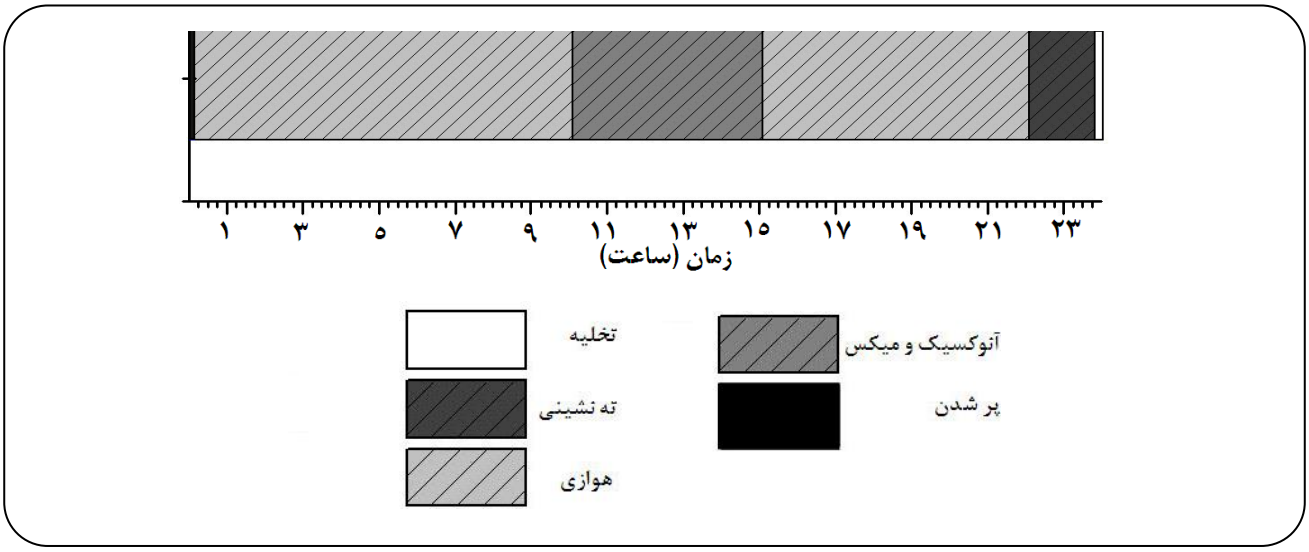
پساب مصنوعی

پساب مورد استفاده در این پژوهش به صورت مصنوعی و با استفاده از شیر خشک به عنوان منبع کربن و ریز مغذی‌های مورد نیاز هم‌چون آمینو اسید، ویتامین ها و غیره تهیه شد. همچنین به عنوان منبع نیتروژن آمونیاکی از کلرید آمونیوم (NH_4CL) و به عنوان منبع نیتروژن آلی از اوره ($CO(NH_2)_2$) استفاده شد. ویژگی‌های پساب مصنوعی و ترکیب آن برای به دست آوردن یک لیتر پساب مصنوعی به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ موجود است.

(۱) Mixed liquor suspended solids
(۲) Solids retention time
(۳) Dissolved oxygen
(۴) Oxidation–reduction potential

جدول ۲ـ زمان بندی سیکل راکتور در مرحله‌های گوناگون پژوهش.

شرایط واکنش	مدت زمان (دقیقه)	عملیات	راکتور
آنوکسیک	۵	پر شدن	راکتور شاهد
هوازی	۶۰۰	واکنش	
آنوکسیک	۳۰۰		
هوازی	۴۲۰		
آنوکسیک	۱۰۵	ته نشینی	
آنوکسیک	۱۰	تخلیه	
آنوکسیک	۵	پر شدن	راکتور آزمایش (دوره ۱)
هوازی	۶۰۰	واکنش	
آنوکسیک	۱۲۰		
آنوکسیک	۵	افزودن منبع کربن داخلی	
آنوکسیک	۱۷۵	واکنش	
هوازی	۴۲۰		
آنوکسیک	۱۰۵	ته نشینی	
آنوکسیک	۱۰	تخلیه	
آنوکسیک	۵	پر شدن	راکتور آزمایش (دوره ۲)
هوازی	۳۰۰	واکنش	
آنوکسیک	۱۲۰		
آنوکسیک	۵	افزودن منبع کربن داخلی	
آنوکسیک	۱۲۰	واکنش	
هوازی	۲۴۰		
آنوکسیک	۱۸۰		
آنوکسیک	۵	افزودن منبع کربن داخلی	
آنوکسیک	۱۷۰	واکنش	
هوازی	۱۸۰		
آنوکسیک	۱۰۵	ته نشینی	
آنوکسیک	۱۰	تخلیه	



شکل ۳ـ زمان بندی راکتور ناپیوسته متوالی با یک مرحله آنوکسیک.

نتیجه ها و بحث

به منظور انجام نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون، باید دو مرحله هوازی و آنوکسیک به صورت پی در پی ایجاد شود. برای این منظور دو روش وجود دارد. در صورتی که مرحله هوازی در ابتدا و پس از آن مرحله آنوکسیک قرار بگیرد، در اثر نیتریفیکاسیون در قسمت هوازی، آمونیوم ورودی به نیترات تبدیل می شود سپس در قسمت آنوکسیک، در اثر دنیتریفیکاسیون این نیترات به نیتریت و نیتروژن تبدیل می‌شود. روش دوم به این صورت است که مرحله آنوکسیک در ابتدا و پس از آن مرحله هوازی قرار بگیرد. در این صورت در قسمت آنوکسیک در اثر دنیتریفیکاسیون مقدار نیترات کاهش می‌یابد و به طور همزمان آمونیوم به دلیل ورود خوراک افزایش می‌یابد. سپس در قسمت هوازی نیتریفیکاسیون انجام می شود و آمونیوم به نیترات تبدیل می شود. این نیترات در سیکل بعدی تصفیه توسط راکتور SBR مورد استفاده قرار می گیرد و به نیتریت تبدیل می‌شود. در این پژوهش ترکیبی از این دو روش استفاده شده است یعنی مرحله‌های هوازی و آنوکسیک به صورت پی در پی به کار گرفته شده‌اند و مرحله آخر از هر سیکل هوازی در نظر گرفته شده است. با استفاده از این استراتژی دنیتریفیکاسیون هر مرحله آنوکسیک با استفاده از نیترات موجود از مرحله هوازی قبل انجام می شود ضمن آنکه در ابتدای هر سیکل، پر شدن راکتور در شرایط آنوکسیک انجام می‌شود. در هر سیکل ۸ لیتر از حجم راکتور تخلیه نشده و در سیکل بعدی مورد استفاده قرار گرفت. ۸ لیتر انتقال یافته به سیکل بعد دارای نیترات مورد نیاز برای دنیتریفیکاسیون بود.

یادآوری می‌شود که نسبت C/N در خوراک ورودی برابر ۱۲/۵ بوده همچنین DO، دما و pH نیز به ترتیب برابر با ۰/۷ mg/L، ۲۰ درجه سلسیوس و ۶ بود. بارگزاری نیتروژن نیز پس از برقراری شریط پایدار در راکتور برابر با ۰/۰۵۴ kg N/m^3d بود. نتیجه‌های کلی به دست آمده از سه مرحله پژوهش شامل راکتور شاهد، دوره اول و دوم، در جدول ۵ ارایه شده است. مقدارهای اولیه بارگزاری آلی، بارگزاری نیتروژن و تعداد دفعه‌های افزودن منبع کربن، در طول پژوهش تغییر داده شده و اثر هر یک از این تغییرها بر حذف زیستی نیتروژن بررسی شد که نتیجه‌های آن در ادامه به صورت دقیق بیان خواهد شد.

اثر تعداد دفعه‌های افزودن منبع کربن داخلی

در این پژوهش ابتدا کار با یک بار پر شدن راکتور ناپیوسته متوالی در شرایط آنوکسیک آغاز شد و نتیجه‌ها ثبت شد. پس از آن به عنوان افزودن منبع کربن داخلی، اثر دو بار و سه بار پر شدن راکتور به صورت آنوکسیک نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان داد که تعداد دفعه‌های افزودن منبع کربن رابطه ای مستقیم با بازدهی حذف زیستی نیتروژن داشته و بازدهی حذف نیتروژن افزایش یافت. بنابراین در دوره اول و دوم آزمایش نیاز به پر شدن راکتور بیش از یک بار وجود داشت و این پر شدن راکتور، در قسمتی از بازه زمانی واکنش آنوکسیک در نظر گرفته شد. نتیجه‌ها نشان داد که در صورت یک بار پر شدن راکتور و بدون استفاده از منبع کربن خارجی یا داخلی ، بازدهی حذف TN که

جدول ۳ـ ویژگی‌های پساب مصنوعی.

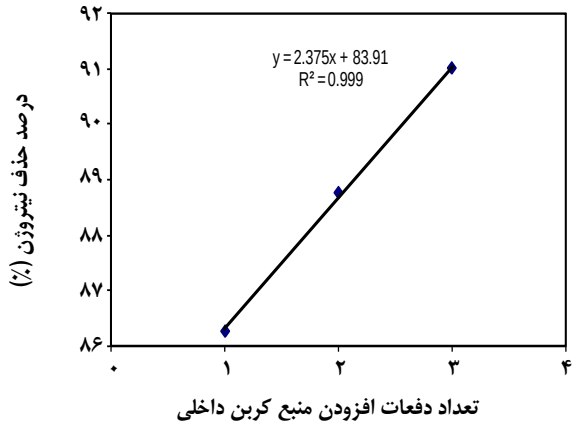
نتیریت (میلی گرم بر لیتر)	نیترات (میلی گرم بر لیتر)	نیتروژن آلی (میلی گرم بر لیتر)	آمونیوم (میلی گرم بر لیتر)	نیتروژن کجلدال (میلی گرم بر لیتر)	نیتروژن کل (میلی گرم بر لیتر)	اکسیژن خواهی شیمیایی (میلی گرم بر لیتر)
۰/۱	۰/۵	۲۹	۵۰	۷۹	۸۰	۱۰۰۰

جدول ۴ـ ترکیب‌های افزوده شده به یک لیتر آب مقطر برای شبیه‌سازی کربن و نیتروژن پساب مصنوعی.

اوره (گرم)	کلرید آمونیوم (گرم)	شیر خشک (گرم)
۰/۰۳۰	۰/۰۵۶	۱/۶

جدول ۵ ـ نتیجه‌های کلی به دست آمده از سه مرحله پژوهش.

بازدهی حذف نیتروژن (درصد)	آمونیوم خروجی (میلی گرم بر لیتر)	نیتریت خروجی (میلی گرم بر لیتر)	نیترات خروجی (میلی گرم بر لیتر)	زمان ماند سلولی (روز)	بارگزاری نیتروژن (کیلو گرم نیتروژن به ازای هر متر مکعب در روز)	بارگزاری آلی (کیلو گرم COD به ازای هر متر مکعب در روز)	نیتروژن کل ورودی (میلی گرم بر لیتر)	اکسیژن خواهی شیمیایی (میلی گرم بر لیتر) ورودی	راکتور
۸۶/۲۵	۱/۷۰	۰/۲۷	۹/۵۴	۲۰	۰/۰۵۴	۰/۶۷	۸۰	۱۰۰۰	شاهد
۸۸/۷۵	۰/۷۹	۰/۱۹	۷/۲۵	۲۰	۰/۰۵۴	۰/۶۷	۸۰	۱۰۰۰	آزمایش دوره ۱
۹۱	۰/۷۲	۰/۲۳	۵/۹	۲۰	۰/۰۵۴	۰/۶۷	۸۰	۱۰۰۰	آزمایش دوره ۲
۸۸/۸۱	۰/۸۱	۰/۱۸	۱۴/۳	۲۰	۰/۱	۰/۶۷	۱۴۷/۵	۱۰۰۰	آزمایش دوره ۲
۸۶/۴۸	۱/۹۰	۰/۴۲	۲۵/۵	۲۰	۰/۱۵	۰/۶۷	۲۲۲	۱۰۰۰	آزمایش دوره ۲
۸۰	۱/۹۴	۰/۳۵	۱۳	۲۰	۰/۰۵۴	۱	۸۰	۱۵۰۰	آزمایش دوره ۲
۷۳/۷۵	۲/۱	۰/۵۶	۱۷	۲۰	۰/۰۵۴	۱/۵	۸۰	۲۲۰۰	آزمایش دوره ۲



شکل ۴ـ رابطه میان تعداد دفعه‌های افزودن منبع کربن و درصد حذف نیتروژن.

توسط رابطه (۶) محاسبه شده است، برابر ٪ ۸۶٫۲۵ بود. در دوره اول پژوهش با یک بار افزودن منبع کربن داخلی این بازدهی به ٪ ۸۸٫۷۵ رسید و در دوره دوم یعنی با دو بار افزودن منبع کربن در شرایط آنوکسیک، بازدهی حذف نیتروژن ٪ ۹۱ بود. دلیل این بهینه‌سازی این است که در هنگام ورود خوراک به راکتور، دنیتریفیکاسیون با منبع کربن داخلی افزوده شده به خوبی انجام می‌گیرد درحالی که در روش های معمول، منبع کربن تنها یک بار افزوده می‌شود. شکل ۴ رابطه میان تعداد دفعه‌های افزودن منبع کربن داخلی و درصد حذف نیتروژن را نشان می دهد.

(۶) =درصد حذف (٪)

۱۰۰×[غلظت ورودی/(غلظت خروجی–غلظت ورودی)]

در این رابطه:

درصد حذف: بازدهی حذف نیتروژن (٪)

غلظت ورودی: غلظت نیتروژن در خوراک ورودی به راکتور (میلی گرم بر لیتر)

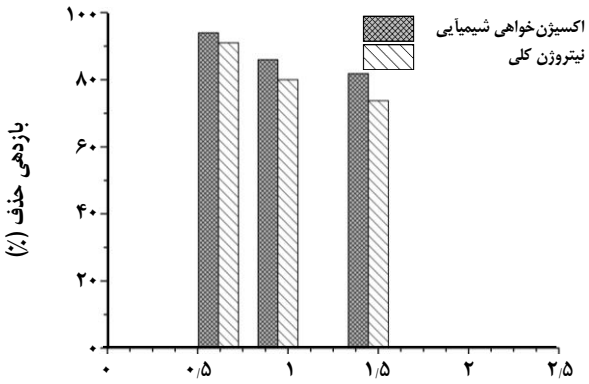
غلظت خروجی: غلظت نیتروژن در پساب خروجی از راکتور (میلی گرم بر لیتر)

اثر بارگزاری آلی

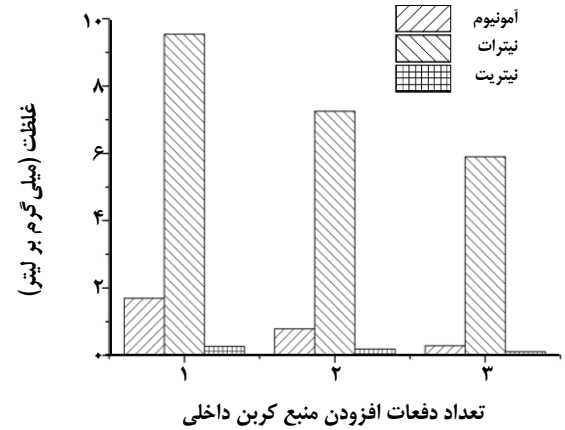
پس از آنکه پایلوت در شرایط بارگزاری آلی ۰٫۶۷ kg COD/m^{3}d و COD ورودی برابر ۱۰۰۰ mg/L مورد آزمایش قرار گرفت و نتیجه‌ها ثبت شد، کارایی سیستم در تصفیه پساب مصنوعی با بارگزاری آلی بالاتر نیز مورد آزمایش قرار گرفت. بر این اساس در حالتی که COD خوراک ورودی به راکتور افزایش داده شد، بارگزاری آلی برابر ۱ و پس از آن ۱٫۵ kg COD/m^{3}d نیز بررسی شد. نتیجه‌های دوره دوم پژوهش نشان داد که راکتور ناپیوسته متوالی با دو بار افزودن منبع کربن داخلی در هر سیکل قادر است بارگزاری ۱kgCOD/m^{3}d را نیز تحمل کرده و عملیات تصفیه زیستی را بدون کاهش چشمگیر در بازدهی حذف COD و TN انجام دهد. در این شرایط بازدهی حذف TN در سیستم انتخابی ۸۰ ٪ بود. شایان ذکر است که عملیات در بارگزاری ۱٫۵ kgCOD/m^{3}d نیز تکرار شد ولی بازدهی دلخواهی دیده نشد. در این شرایط راندمان حذف نیتروژن کل برابر با ٪ ۷۳٫۷۵ بود. شکل ۵ اثر تغییر بارگزاری آلی بر روی COD و TN راکتور با دو بار افزودن منبع کربن در هر سیکل را نشان می‌دهد.

اثر بارگزاری نیتروژن

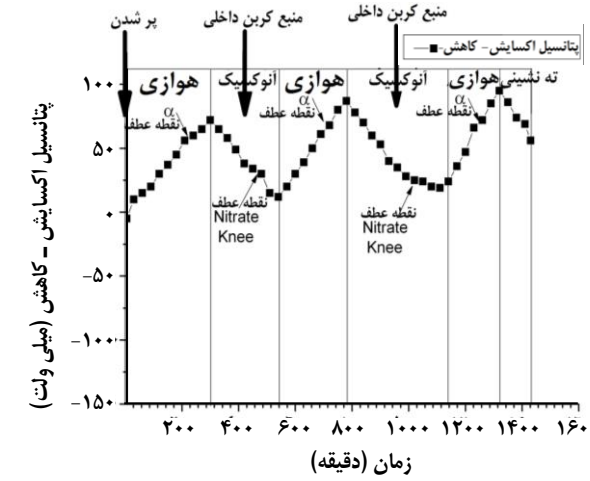
یکی از مهم ترین مسائل در بررسی کارایی سامانه به کار گرفته شده مشخص نمودن این مسئله است که راکتور ناپیوسته متوالی با پر شدن چندگانه قادر است چه میزانی از نیتروژن ورودی را تحمل کند. برای این منظور سه غلظت نیتروژن کل ورودی برابر ۸۰، ۱۴۷٫۵ و ۲۲۲ mg/L مورد آزمایش قرار داده شد. بر این اساس کارایی راکتور با سه بارگزاری نیتروژن برابر ۰٫۰۵۴، ۰٫۱ و ۰٫۱۵ kgCOD/m^{3}d بررسی شد. سه فرم نیتروژن که در پساب خروجی مورد توجه قرار گرفت آمونیوم، نیترات و نیتریت بود. با توجه به استاندارد پساب خروجی در کشور ایران می‌توان گفت که در دوره دوم پژوهش یعنی با دو بار افزودن منبع کربن داخلی به راکتور، سه بارگزاری نیتروژن برابر ۰٫۰۵۴، ۰٫۱ و ۰٫۱۵ kg COD/m^{3}d استاندارد تخلیه پساب به آب های پذیرنده را برآورده نمود. این استاندارد بیش‌ترین مقدارهای آمونیوم، نیترات و نیتریت به ترتیب برابر ۲٫۵ ، ۵۰ و ۱۰ mg/L را برای تخلیه به آبهای سطحی مجاز دانسته است [۱۴]. بررسی پساب خروجی از راکتور نشان داد که با بارگزاری نیتروژن برابر ۰٫۱۵ kgCOD/m^{3}d، مقدار آمونیوم، نیترات و نیتریت به ترتیب برابر ۱٫۹۰، ۲۵٫۵ و ۰٫۴۲ mg/L بود. این نتیجه‌ها انعطاف پذیری بالای روش تصفیه انتخابی در بارگزاری های گوناگون نیتروژن را نشان می‌دهد. شکل ۶ تغییرهای آمونیوم، نیترات و نیتریت پساب در سه مرحله پژوهش برای TKN ورودی ۷۹ mg/L ، نیتروژن کل ورودی ۸۰ mg/L و بارگزاری نیتروژن ۰٫۰۵۴ kg N/m^{3}d را نشان می‌دهد.



شکل ۵ ـ اثر بارگزاری آلی بر بازدهی تصفیه.



شکل ۶ ـ مقدار آمونیوم، نیترات و نیتریت پساب در بارگزاری آلی ۰/۰۵۴ کیلوگرم نیتروژن به ازای هر متر مکعب در روز.



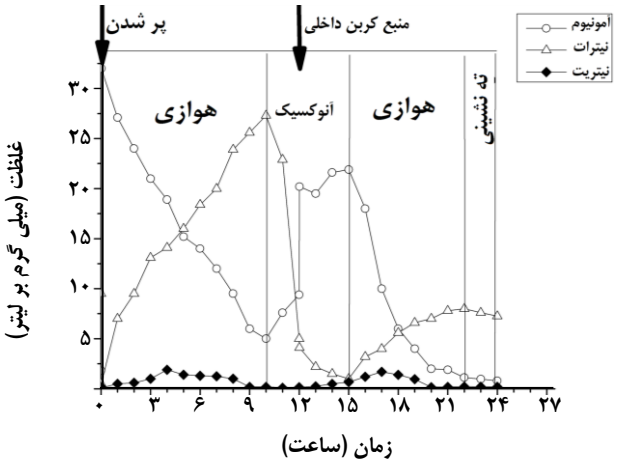
شکل ۷ـ تغییرهای پتانسیل اکسایش-کاهش در یک سیکل نمونه راکتور.

بررسی رابطه ORP با نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون

عامل تعیین کننده دیگری که در بررسی نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون مورد توجه قرار می گیرد، پتانسیل اکسایش-کاهش (ORP) می باشد. این فاکتور می تواند پایان نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون را در فرایند تصفیه زیستی پساب به ما نشان دهد. اگر به نمودار تغییرهای ORP بر حسب زمان واکنش دقت شود، دو نقطه از این نمودار در حذف زیستی نیتروژن برای ما مهم محسوب می شود. در شرایط هوازی نمودار ORP صعودی خواهد بود و سپس در یک نقطه عطف شاهد تغییر انحنا خواهیم بود. این نقطه α نام دارد که نشان دهنده پایان نیتریفیکاسیون در راکتور است. همچنین در شرایط آنوکسیک نمودار ORP نزولی خواهد بود و در یک نقطه تغییر انحنا دیده می‌شود. این نقطه به نام Nitrate Knee شناخته می شود و بیانگر حذف شکل‌های نیتروژن تجمع یافته شامل نیترات و نیتریت می‌باشد [۱۵]. برای بررسی این تغییرها، یک سیکل نمونه از راکتور ناپیوسته متوالی با دو بار افزودن منبع کربن داخلی به راکتور در شرایط جریان پایدار مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های به دست آمده از اندازه گیری ORP در فاصله های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای در این سیکل با بارگزاری ۰/۰۵۴ kgN/m^3d در شکل شماره ۷ دیده می‌شود. همان گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، نقاط α در قسمت‌های هوازی واکنش، بیانگر پایان نیتریفیکاسیون و نقاطی که با عبارت Nitrate Knee در قسمت‌های آنوکسیک واکنش مشخص شده اند، بیانگر مصرف شدن اکسیدهای نیتروژن (NO_x^-) تشکیل شده، یعنی پایان دنیتریفیکاسیون می‌باشد.

تغییر نیترات، نیتریت و آمونیوم در یک سیکل راکتور

در این پژوهش به منظور بررسی تغییر شکل‌های نیتروژن نیز یک سیکل نمونه از راکتور با یک بار افزودن منبع کربن در حالت شرایط جریان پایدار بررسی شد. نتیجه‌های به دست آمده از اندازه گیری غلظت نیترات، نیتریت و آمونیوم در فاصله‌های زمانی ۱ ساعته در شرایط بارگزاری ۰/۰۵۴ $kg\ N/m^3d$ در شکل ۸ ارایه شده است. همانگونه که دیده می‌شود در ابتدای سیکل پس از افزوده شدن خوراک ورودی غلظت آمونیوم در راکتور بالا بوده و در مدت زمان واکنش هوازی، غلظت آمونیوم تا ۵ mg/L کاهش یافت. دلیل این کاهش انجام نیتریفیکاسیون در شرایط هوازی است و به موازات آن غلظت نیترات در راکتور



شکل ۸ ـ تغییر نیترات، نیتریت و آمونیوم در یک سیکل نمونه راکتور.

افزایش یافت. در پایان مرحله هوازی اول، غلظت نیترات تا مقدار ۲۷٫۳ mg/L نیز افزایش یافت. پس از آن مرحله آنوکسیک واکنش به منظور حذف نیترات تجمع یافته (دنیتریفیکاسیون) آغاز شد که در قسمتی از این مرحله، دوباره منبع کربن داخلی وارد راکتور شد. در پایان ۵ ساعت واکنش آنوکسیک، غلظت نیترات و نیتریت به ترتیب به ۱ و ۰٫۶۸ mg/L رسید. سپس دوباره مرحله هوازی آغاز شد و پس از ۷ ساعت واکنش هوازی و با پایان یافتن زمان ته نشینی، غلظت نیترات، نیتریت و آمونیوم به ترتیب برابر ۷٫۲۵ ، ۰٫۱۹ و ۰٫۷۹ mg/L اندازه گیری شد.

آنالیز آماری یافته ها

به منظور بررسی معنی دار بودن اختلاف نتیجه‌های به دست آمده از آنالیز آماری نتیجه‌ها استفاده شد. آنالیز آماری بر اساس روش آنالیز واریانس یک سویه صورت پذیرفت. در این روش ابتدا باید شرط وجود توزیع نرمال داده ها بررسی شده و سپس معنی‌دار بودن اختلاف نتیجه‌های مرحله‌های گوناگون، با یکدیگر بررسی شود. در این پژوهش هر یک از آزمایش های تعیین غلظت فرم های نیتروژن شامل آمونیوم، نیترات، نیتریت دست کم سه بار (چهار بار) تکرار شد و از طرفی محاسبه بازدهی حذف نیتروژن در هر مرحله نیز چهار بار محاسبه شد. پیش از ثبت نتیجه‌ها در هر دوره، به دلیل تغییر شرایط موجود، راکتور میان دو دوره به مدت سه هفته راهبری شد تا نتیجه‌ها قابل اطمینان باشد و میکروارگانیسم‌ها در شرایط جدید به تثبیت برسند. به دلیل وجود سه مرحله گوناگون (شاهد، دوره اول و دوره دوم)، و این‌که در هر مرحله چهار داده (نتیجه محاسبه بازدهی) وجود داشت، در مجموع دوازده داده پیش از تغییر بارگزاری آلی و بارگزاری نیتروژن راکتور در دست بود. به عبارت دیگر سه گروه که هر گروه چهار داده داشت. نتیجه‌های آزمون نرمالیته نشان داد که فرض نرمال بودن توزیع داده‌های هر گروه به ترتیب با درصد اطمینان‌های ۰٫۳۱، ۰٫۲۷ و ۰٫۲۷ که همگی بیش از مقدار پیش فرض درصد اطمینان نرمالیته یعنی ۰٫۰۵ بودند، تأیید شد. با تأیید این فرض، آزمون آنالیز واریانس یک سویه انجام شد. در این آزمون ابتدا میانگین بازدهی حذف نیتروژن در هر گروه محاسبه شد و سپس مجموع مربع‌های کلی از به توان ۲ رساندن اختلاف هر بازدهی حذف نیتروژن با نیتجه میانگین کلی، به دست آمد.

مجموع مربع‌های درون گروه از به توان ۲ رساندن اختلاف هر بازدهی حذف نیتروژن با میانگین هر یک از گروه ها محاسبه شد. مجموع مربع‌های بین گروهی از محاسبه اختلاف مجموع مربع‌های کلی و مجموع مربع‌های درون گروه محاسبه شد. درجه آزادی کل ۱۱، درجه آزادی درون گروه ۹ و درجه آزادی بین گروه ۲ بود. سپس مجموع کلی مربع‌های بین گروهی و مجموع کلی مربع‌های درون گروه بر درجه آزادی هر یک تقسیم شد تا واریانس محاسبه شود. در مرحله بعدی نسبت واریانس‌ها (F) از رابطه‌های موجود در معادله‌های (۷) تا (۹) [۱۶] برابر با ۴۲٫۰۴ محاسبه شد:

$$F = \frac{MSB}{MSW} \qquad (۷)$$

$$MSB = \frac{SSB}{df_b} \qquad (۸)$$

$$MSW = \frac{SSW}{df_w} \qquad (۹)$$

در این رابطه ها:

F : نسبت واریانس ها

MSB : میانگین مربع‌های بین گروه

MSW : میانگین مربع‌های درون گروه

SSB : مجموع مربع‌های بین گروهی

SSW : مجموع مربع‌های درون گروه

df_w : درجه آزادی درون گروه

df_b : درجه آزادی بین گروهی

جدول ۶ ـ مقایسه نتیجه‌های پژوهش با تعدادی از مطالعه‌های همانند.

بازدهی حذف نیتروژن (٪)	زمان ماند سلولی (روز)	زمان ماند هیدرولیکی (روز)	نیتروژن کل ورودی (میلی گرم بر لیتر)	اکسیژن خواهی شیمیایی ورودی (میلی گرم بر لیتر)	تعداد دفعات پر شدن	منبع کربن خارجی	نوع پساب	منبع
۸۰	۱۸–۲۵	۲–۳	۱۳۴۲±۱۶۸$^{++}$	۳۰۲۳±۱۴۴۳	۱	بله	صنعتی	[۱۷]
۹۰			۲۰۰۰$^{++}$	۲۲۰۰	۳	خیر	شیرابه زباله	[۱۸]
۸۸	۱۰	۰/۳	۵۲/۹±۱۷/۱	۳۰۸±۱۷۲	۳	خیر	شهری	[۱۹]
۶۱/۲۵			۳۰$^{++}$	۳۰۰	۲	خیر	مصنوعی	[۲۰]
۲۳	۲۰	۱/۶۷	۶۳۰$^{+}$	۱۵۰۰	۱	بله	صنعتی	[۲۱]
۷۹	۱۷	۱/۶۷	۶۳۰$^{+}$	۱۵۰۰	۱	خیر	صنعتی	[۲۱]
۹۷/۲	۲۷	۴۸	۱۴۲۸$^{-}$	۸۸۹۴$^{-}$	۳	خیر	شیرابه زباله	[۲۲]
۹۸/۳		۱/۵	۷۱۴/۵$^{-}$	۱۵۱۷۸$^{-}$	۱	بله	شیرابه زباله	[۲۳]
۹۵	۲۳	۱/۱۱	۵۳/۶	۵۳۲	۶	خیر	شهری	[۲۴]
۵۲	۲۵	۰/۳	۲۵	۲۰۰	۲	خیر	شهری	[۲۵]
۱۰۰	۲۵		۳۵	۲۰۱/۷$^{-}$	۱	بله	شهری	[۲۶]
۸۶/۲۵ ۸۸/۷۵ ۹۱	۲۰	۱/۴۷	۸۰	۱۰۰۰	۱ ۲ ۳	خیر	مصنوعی	تحقیق حاضر

+: TKN به عنوان نیتروژن، ++: آمونیوم به عنوان نیتروژن، -: اعداد به صورت میانگین

در این مرحله درصد اطمینان ۰/۰۰۵ برای رد فرض همانند بودن نتیجه‌ها انتخاب شد. سپس بر اساس درجه‌های آزادی، مقدار F در شرایط بحرانی (F_{crit}) از جدول به دست آمد. سرانجام برای تصمیم‌گیری در مورد معنی دار بودن نتیجه‌ها، مقایسه ای میان درصدهای اطمینان به دست آمده و در صد اطمینان پیش فرض صورت گرفت و اختلاف نتیجه‌های هر گروه از بازده حذف نیتروژن که درصد اطمینانی کمتر از ۰/۰۰۵ داشت، و یا مقدار F در آن بالاتر از F_{crit} بود، معنی دار ارزیابی شد. این دو معیار تصمیم‌گیری به صورت هم زمان اتفاق افتاده و معنی دار بودن نتیجه‌ها را تأیید کردند. با این روش اختلاف میان نتیجه‌های مربوط به راکتور شاهد و راکتور آزمایش در دوره اول (۲/۵ ٪) و راکتور آزمایش در دوره دوم (۴/۷۵ ٪) و همچنین اختلاف نتیجه‌های راکتور در دوره اول و دوم (۲/۲۵ ٪) معنادار ارزیابی شد. از سویی بالا بودن مقدار F نشانه دیگری از معنا دار بودن اختلاف نتیجه‌های بازدهی حذف نیتروژن بود.

مقایسه نتیجه‌ها با پژوهش‌های مشابه

جمع بندی مقایسه نتیجه‌های پژوهش حاضر با نتیجه‌های سایر پژوهشگران، در جدول ۶ ارایه شده است. در تهیه این جدول سعی شده است که نتیجه‌های تعدادی از مطالعه‌های دیگر بر روی حذف زیستی نیتروژن با استفاده از راکتور ناپیوسته متوالی بررسی شود.

نتیجه گیری

در صورت استفاده از منابع کربن خارجی مانند اسید استیک و متانول در تصفیه خانه ها، هزینه حذف مواد مغذی، نظیر نیتروژن، از پساب افزایش می یابد. در این پژوهش مشخص شد که با استفاده از منبع کربن داخلی و با در نظر گرفتن شرایط بهره برداری ویژه، می توان نتیجه‌های قابل قبولی در مورد حذف نیتروژن از پساب به دست آورد. راهکار مورد استفاده در این پژوهش، چند بار افزودن منبع کربن داخلی به راکتور ناپیوسته متوالی (SBR) بود. در این صورت کربن مورد نیاز برای انجام

فرایند دنیتریفیکاسیون چند بار در طول یک سیکل به راکتور افزوده شد. در یک سیکل راکتور چند بازه زمانی هوازی و آنوکسیک به صورت متوالی در نظر گرفته شد. به این ترتیب نیترات تولید شده در مرحله هوازی، در مرحله آنوکسیک حذف شده و کربن مورد نیاز باکتری‌های هتروتروف با ورود دوباره خوراک در شرایط آنوکسیک، در اختیار آن‌ها قرار می‌گیرد. برای به دست آوردن بهترین نتیجه‌ها، اثر بارگزاری های نیتروژن گوناگون در مدت زمان پژوهش بررسی شد. همچنین اثر تعداد دفعه‌های افزودن منبع کربن به راکتور نیز بررسی شد و راکتور با یک و دو بار افزودن منبع کربن در هر سیکل مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان داد که پساب خروجی در هر سه بارگزاری، استاندارد پساب خروجی برای آمونیوم، نیترات و نیتریت را برآورده ساخت. با این وجود بهترین عملکرد راکتور در کم‌ترین بارگزاری نیتروژن و کمترین بارگزاری آلی به دست آمد. در این حالت مقدار آمونیوم، نیترات و نیتریت در پساب خروجی از راکتور کم‌ترین مقدار ممکن بود. نتیجه‌های پژوهش ثابت نمود که در صورت استفاده از روش پر شدن چدگانه راکتور، فرایند حذف زیستی نیتروژن انعطاف پذیری بالایی با بارگزاری‌های آلی و نیتروژن گوناگون نشان خواهد داد. با این وجود بازدهی حذف COD نیز باید مورد قبول باشد و در این زمینه دوره دوم پژوهش با دو بار افزودن منبع کربن، به عنوان بهترین عملکرد راکتور انتخاب شد. با وجود ویژگی‌های مثبت بیان شده، به عنوان نقطه ضعف سیستم انتخابی، می‌توان دشوار بودن تنظیم چند بازه زمانی هوازی و آنوکسیک به طور دقیق در زمان بهره‌برداری را یاد نمود که البته این مورد در مقایسه با دشواری‌های اضافه کردن منبع کربن خارجی مانند متانول، قابل چشم پوشی است.

قدردانی

بدین وسیله از آقایان حمزه علیزاده و محمد جواد حاج سردار به دلیل همکاری با واحد نیمه صنعتی این پژوهش قدردانی به عمل می‌آید.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۷/۱۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱/۳۰

مراجع

[۱] کریمی، بهروز؛ بررسی استفاده از فرایند اکسایش پیشرفته در حذف ترکیب های نیتروژن دار از شیرابه کارخانه کمپوست اصفهان، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) **۳۱**: ۳۳ تا ۳۸ (۱۳۹۱).

[2] Alemzadeh I., Nazemi A., Physico-Chemical and Biological Treatment of Olive Mill Wastewater by Rrotating Biological Contactor (RBC) Reactors, *Iran. J. Chem. Chem. Eng.(IJCCE)*, **25**(4): 47-53 (2006).

[3] Guo W.Q., Yang S.S., Xiang W.S., Wang X.J., Ren N.Q., Minimization of Excess Sludge Production by In-Situ Activated Sludge Treatment Processes—A Comprehensive Review, *Biotechnol. Adv.*, **31**(8): 1386-1396 (2013).

[4] Lourenço N D., Franca R.D.G., Moreira M.A., Gil F.N., Viegas C.A., Pinheiro H.M., Comparing Aerobic Granular Sludge and Flocculent Sequencing Batch Reactor Technologies for Textile Wastewater Treatment, *Biochem. Eng. J.*, **104**: 57-63 (2015)

[5] Kulkarni P., Nitrophenol Removal by Simultaneous Nitrification Denitrification (SND) Using T. pantotropha in Sequencing Batch Reactors (SBR), *Bioresour. Technol.*, ***128***: 273-280 (2013)

[6] Metcalf, Eddy, Inc., "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse", 4th Ed., Mc Graw-Hill, Boston (2003).

[7] Moura I., Pauleta S.R., Moura J.J., Enzymatic Activity Mastered by Altering Metal Coordination Spheres, *J. Biol. Inorg. Chem.*, **13**(8): 1185-1195 (2008).

[8] U.S.E.P.A., "Wastewater Treatment Fact Sheet: External Carbon Sources for Nitrogen Removal", United States Environmental Protection Agency, Office of Wastewater Management, EPA 832-F-13-016 (2013).

[9] Guo J., Yang Q., Peng Y., Yang A., WANG H., Biological Nitrogen Removal with Real-Time Control Using Step-Feed SBR Technology, *Enzyme Microb. Technol*, **40**(6): 1564-1569 (2007).

[10] Guo J., Peng Y., Yang Q., Wang S., Chen Y., Zhao C., Theoretical Analysis and Enhanced Nitrogen Removal Performance of Step-Feed SBR, *Water Sci. Technol.*, **58**(4): 795-802 (2008).

[۱۱] اشرفی، الهام؛ برقعی، سید مهدی؛ جداسازی توده‌های میکروبی در راکتورهای زیست فیلمی بستر متحرک به‌وسیله صافی‌های دست‌ساز، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۴)**۳۲**: ۱۰۵ تا ۱۱۷ (۱۳۹۲).

[13] Arabi R., Bemanian, S., Taherzadeh M.J., Rapid Biodegradation of Methyl tert-Butyl Ether (MBTE) by Pure Bacterial Cultures, *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **26**(1): 1-7 (2007).

[13] APHA., "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 20th Edition, American Public Health Association, American Water Environment Federation, Washington D.C (1998).

[۱۴] سازمان حفاظت از محیط زیست؛ "استانداردهای خروجی فاضلاب به استناد ماده ۵ آیین نامه جلوگیری از آلودگی آب"، ص. ۳ (۱۳۷۳).

[15] Irizar I., Zambrano J., Carlsson B., Morrás M., Aymerich,E., Robust Tuning of Bending-Points Detection Algorithms in Batch-Operated Processes: Application to Autothermal Thermophilic Aerobic Digesters, *Environ. Model. Softw.*, **71**: 148-158 (2015).

[16] Brown A.M., A Spreadsheet Template Compatible with Microsoft Excel and iWork Numbers that Returns the Simultaneous Confidence Intervals for All Pairwise Differences between Multiple Sample Means, *Comput. Methods Programs Biomed*., **98**(1): 76-82 (2010).

[17] Scaglione D., Tornotti G., Teli A., Lorenzoni L., Ficara E., Canziani R., Malpei F., Nitrification Denitrification via Nitrite in A Pilot-Scale SBR Treating the Liquid Fraction of Co-Digested Piggery/Poultry Manure and Agro-Wastes, *Chem. Eng. J*., **228**: 935-943 (2013).

[18] Miao L., Wang K., Wang S., Zhu R., Li B., Peng Y., Weng D., Advanced Nitrogen Removal from Landfill Leachate Using Real-Time Controlled Three-Stage Sequence Batch Reactor (SBR) System, *Bioresour. Technol*., **159**: 258-265 (2014).

[19] Ge S., Peng Y., Wang S., Guo J., Ma B., Zhang L., Cao X., Enhanced Nutrient Removal in A Modified Step Feed Process Treating Municipal Wastewater with Different Inflow Distribution Ratios and Nutrient Ratios, *Bioresour. Technol*., **101**(23): 9012-9019 (2010).

[20] Ma B., Wang S., Zhu G., Ge S., Wang J., Ren N., Peng Y., Denitrification and Phosphorus Uptake by DPAOs Using Nitrite as an Electron Acceptor by Step-Feed Strategies, *Front. Environ. Sci. En.*, **7**(2): 267-272 (2013).

[21] Villaverde S., Garcia Encina P.A., Lacalle M.L., Fdez.Polamco F., New Operational Technology for Total Nitrogen Removal from Industrial Wastewater Highly Loaded with Nitrogen, *Water Sci. Technol.*, **41**(12): 85-93 (2000).

[22] Zhu R., Wang S., Li J., Wang K., Miao L., Ma B., Peng Y., Biological Nitrogen Removal from Landfill Leachate Using Anaerobic–Aerobic Process: Denitritation Via Organics in Raw Leachate and Intracellular Storage Polymers of Microorganisms. *Bioresour. Technol*., **128**: 401-408 (2013).

[23] Sun H., Yang Q., Peng Y., Shi X., Wang S., Zhang S., Advanced Landfill Leachate Treatment Using a Two-Stage UASB-SBR System at Low Temperature, *J. Environ. Sci.*, **22**(4): 481-485 (2010).

[24] Puig S., Vives M.T., Corominas L., Balaguer M.D., Colprim J., Wastewater Nitrogen Removal in SBRs, Applying A Step-Feed Strategy: From Lab-Scale to Pilot Plant Operation, *Water sci. and technol*., **50**(10): 89-96 (2004).

[25] Choi E., Park H., Rhu D., Phosphorus Removal from SBR with Controlled Denitrification for Weak Sewage, *Water Sci. Technol.*, **43**(3): 159-165 (2001).

[26] Zhang H., Jiang J., Li M., Yan F., Gong C., Wang Q., Biological Nitrate Removal Using a Food Waste-Derived Carbon Source in Synthetic Wastewater and Real Sewage, *J. Environ. Manage*., **166**: 407-413 (2016).