

ارزیابی عملکرد راکتور ناپیوسته متوالی بستر-متحرک در تصفیه پساب دامداری با فرآیند شوره‌سازی-شوره‌زدایی به‌طور هم‌زمان

سید محمدعلی مسعودی، جواد سرگلزائی، فاطمه ثابتی دهکردی و وحید زینلی

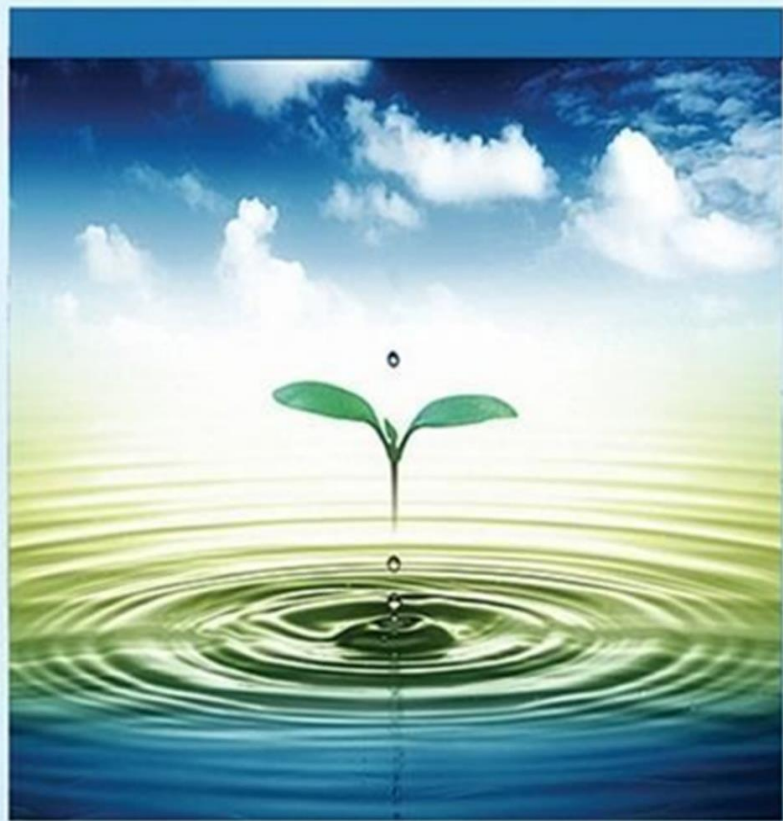
دوره ۵، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸، صفحات ۳۱۵ - ۳۲۷

Vol. 5(4), Winter 2020, 315 – 327

DOI: 10.22034/jewe.2020.205253.1334

**Performance Evaluation of Moving-Bed SBR for
Livestock Wastewater Treatment by SND Process**

Masoudi S. M.A., Sargolzaei J., Sabeti Dehkordi F.
and Zeynali V.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

مسعودی س. م.، سرگلزائی ج.، ثابتی دهکردی ف. و زینلی و. (۱۳۹۸). ارزیابی عملکرد راکتور ناپیوسته متوالی بستر-متحرک در تصفیه پساب دامداری با فرآیند شوره‌سازی-شوره‌زدایی به‌طور هم‌زمان. محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۵، شماره ۴، صفحات: ۳۱۵-۳۲۷.

Citing this paper: Masoudi S. M.A., Sargolzaei J., Sabeti Dehkordi F. and Zeynali V. (2020). Performance evaluation of moving-bed SBR for livestock wastewater treatment by SND process. Environ. Water Eng., 5(4), 315-327. DOI: 10.22034/jewe.2020.205253.1334.

www.SID.ir

ارزیابی عملکرد راکتور ناپیوسته متوالی بستر-متحرک در تصفیه پساب دامداری با فرآیند شوره‌سازی-شوره‌زدایی به‌طور هم‌زمان

سید محمدعلی مسعودی^{۱*}، جواد سرگلزائی^۲، فاطمه ثابتی دهکردی^۱ و وحید زینلی^۳

^۱ کارشناس ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

* نویسنده مسئول: a.masoudi2010@mail.um.ac.ir

مقاله اصلی

تاریخ دریافت: [۱۳۹۸/۰۷/۲۳]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۸/۱۱/۰۹]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۸/۱۱/۱۲]

چکیده

در این مطالعه، عملکرد راکتور ناپیوسته متوالی بستر متحرک با استراتژی هوادهی تناوبی طی فرآیند شوره‌سازی-شوره‌زدایی به‌طور هم‌زمان (SND) برای تصفیه فاضلاب دامداری ارزیابی شد. آنالیز و طراحی آماری برای بهینه‌سازی متغیرهای مستقل مانند زمان ماند لجن، دما و سرعت هوادهی با استفاده از روش سطح پاسخ و طراحی باکس-بنکن انجام شد. اثر متغیرها بر روی حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی و راندمان E_{SND} مورد بررسی قرار گرفت. از آنالیز واریانس برای تأیید مناسب و مهم بودن مدل‌های درجه دوم استفاده شد. بر اساس نتایج، ضریب رگرسیونی بسیار بالا بین متغیرها و پاسخ‌ها که برای حذف COD و راندمان فرآیند SND به ترتیب $R^2 = 0.9788$ و $R^2 = 0.9600$ بودند، نشان از برآورد مناسب داده‌های آزمایش به وسیله مدل‌های رگرسیونی چندجمله‌ای می‌باشد. زمان ماند لجن طولانی اثر منفی پائین را کاسته ولی حذف COD و E_{SND} در دمای بالا را کاهش می‌داد. علاوه بر این، سرعت هوادهی مناسب عاملی حیاتی برای فرآیند SND بود تا تعادل بین فرآیندهای شوره‌سازی و شوره‌زدایی ایجاد شود. در شرایط بهینه به دست آمده از مدل‌ها، در زمان ماند لجن ۲۰ روز، دمای 19.16°C و سرعت هوادهی $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ حذف COD و E_{SND} به ترتیب 92.9% و 91.3% نتیجه شدند. مشخص شد که شرایط بی‌هوای/هوای تناوبی با حالت پر کردن مرحله‌ای یک استراتژی مؤثر، اقتصادی و دوستدار محیط زیست جهت تصفیه بیولوژیکی فاضلاب دامداری در راکتور ناپیوسته متوالی بستر متحرک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: حذف COD؛ راکتور بستر متحرک؛ فاضلاب دامداری؛ شوره‌سازی-شوره‌زدایی؛ هوادهی تناوبی.

۱- مقدمه

تأثیر pH، زمان سیکل راکتور و منبع کربن (گلوکز و سدیم استات) بر فرآیند مذکور مورد بررسی قرار گرفت (Masoudi et al. 2018). از فاکتورهای مهم دیگری که بر فرآیند SND تأثیر می‌گذارند می‌توان به غلظت اکسیژن و اندازه لخته یا ضخامت فیلم زیستی اشاره کرد (Zhang et al. 2008).

راکتور ناپیوسته متوالی (SBR)^۲ نمونه‌ای از تصفیه بیولوژیکی توسعه‌یافته روش لجن فعال است. سیکل عملیاتی SBR به ۵ مرحله تقسیم می‌شود: ۱- پرکردن، ۲- واکنش، ۳- ته‌نشینی، ۴- تخلیه و ۵- مرحله سکون. انعطاف‌پذیری فرآیند، سودمندی در هزینه، نیاز به فضای کم و راندمان زیست‌تجزیه‌پذیری بالا از مزایای این راکتور است (Singh and Srivastava 2010). به کمک SBR یا ترکیب آن با فرآیندهای دیگر، می‌توان مواد آلی، مواد مغذی، ذرات معلق پساب و بسیاری از آلاینده‌ها را از پساب‌های مختلف حذف یا کاهش داد. (Mojiri et al. 2018) با سیستم ترکیبی Electrochemical-Adsorbent-SBR به راندمان بالایی در حذف COD، آمونیاک، فنول و کروم دست یافتند. از SBR برای تصفیه فاضلاب‌های خانگی، شهری، صنعتی، لبنی، شیرابه زباله، کشتارگاه‌ها و صنایع چوب نیز استفاده شده است (Keller et al. 1997; Neczaj et al. 2008; Uygur and Kargi Al- 2004; Li et al. 2008; Azimi et al. 2019; Rekabi et al. 2007; Ros and Vrtovsek 2008).

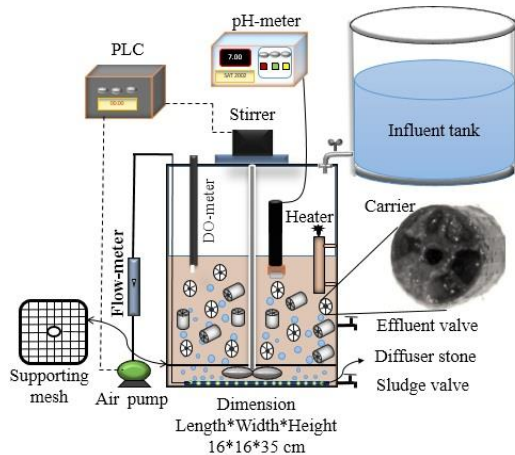
استفاده از MBSBR در تصفیه فاضلاب نیتروژنی با فرآیند شوره‌سازی-شوره‌زدایی به‌طور هم‌زمان به‌واسطه حضور توده زیستی با رشد معلق و چسبیده در پژوهش‌های دیگر مورد بررسی قرار گرفت (Lim et al. 2011; Yang et al. 2010).

در آزمایش‌های چند پارامتری، معمولاً بهینه‌سازی فرآیند با تغییر یک پارامتر و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها در یک مجموعه شرایط خاص صورت می‌گیرد. این روند نه‌تنها وقت‌گیر بوده، بلکه به دلیل نادیده گرفتن برهم‌کنش بین پارامترها قادر به بهینه‌سازی صحیح نمی‌باشد (Wang and Wan 2009). طراحی سطح پاسخ مانند طراحی مرکب

افزایش تولید دام و نگهداری از آن نیازمند توسعه مکان‌های بزرگ‌تر است. یکی از پیامدهای این افزایش، تجمع زیاد دام در یک منطقه محدود به‌منظور کاهش هزینه‌های تولید می‌باشد. حجم زیاد فاضلاب دام یک منبع آلاینده آب‌های سطحی و زیرزمینی خواهد بود زیرا حاوی مقدار زیادی COD، نیتروژن، فسفر، اکسیژن موردنیاز زیست‌شیمیایی (BOD)، رنگ و جامدات معلق است. در بسیاری از کشورها توجه ویژه‌ای به تصفیه فاضلاب دام به‌عنوان یک مشکل بزرگ پرداخته شده است (Lee and Shoda 2008; Juteau et al. 2004; Ferreira et al. 2003; Yang et al. 2003). مقادیر زیاد نیتروژن و فسفر در فاضلاب دامداری می‌تواند منجر به پدیده انباشتگی آب‌خوراکه^۱ در آب‌های پذیرنده به‌ویژه در دریاچه‌ها و رودخانه‌های با جریان آرام شود؛ بنابراین، فرآیند ویژه‌ای برای تصفیه فاضلاب موردنیاز است. بسیاری از صنایع پرورش دام، فرآیندهای سنتی را برای تصفیه فاضلاب دام به‌کار می‌گیرند. چنانچه حجم و دفعات تخلیه فاضلاب تصفیه نشده دام بالاتر باشد، تأثیر منفی آن بیش‌تر خواهد بود. هزینه بالا و عملکرد ضعیف فرآیندهای فیزیکی-شیمیایی در حذف مواد آلی محلول، موجب برتری فرآیند تصفیه زیستی یا بیولوژیکی می‌شود (Othman et al. 2013). از جمله روش‌های نوین بیولوژیکی می‌توان به فرآیند شوره‌سازی-شوره‌زدایی به‌طور هم‌زمان اشاره کرد. فرآیند SND شوره‌سازی دگرپرور و شوره‌زدایی هوازی است که در آن شوره‌سازی و شوره‌زدایی هر دو به‌طور هم‌زمان دست‌یافتنی است (Kulkarni 2013). فرآیند SND در صورت ارزیابی و بهینه‌سازی مناسب نیاز به راکتور مستقل آنوکسیک را برطرف می‌نماید لذا موجب کاهش هزینه‌ها خواهد شد (Murat Hocaoglu et al. 2013). از جمله پارامترهای مهم برای دستیابی به فرآیند SND نسبت کربن به نیتروژن است. با افزایش نسبت COD/N تمایل برای کاهش حذف نیتروژن ممکن است زیرا در غلظت زیاد کربن واکنش شوره‌سازی محدود می‌شود. با این حال، نسبت کم COD/N موجب انجام ناقص واکنش دشوره سازی می‌شود چون که این واکنش به منبع کربن آلی نیاز دارد. همچنین

¹ Eutrophication² Sequencing Batch Reactor (SBR)

جنس شیشه ساخته و مورد استفاده قرار گرفت. در حالت سکون تا ارتفاع ۱۶ cm راکتور با بسترهای پروپیلنی پر شد. بسترها به شکل استوانه بوده و ارتفاع، سطح ویژه و دانسیته آن به ترتیب ۱۵ mm، $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ و g/cm^3 ۰/۹۳ بود (شکل ۱).



شکل ۱- شماتیک راکتور ناپیوسته متوالی بستر متحرک برای تصفیه پساب دامداری

Fig. 1 Schematic of moving-bed SBR for treating livestock wastewater

پساب تصفیه نشده از مخزن پساب که در ارتفاع بالاتری نسبت به راکتور قرار داشت، به حجم ۲ l و در دو مرحله به ازای هر سیکل وارد راکتور شده و پس از پایان هر سیکل، ۱ پساب تصفیه شده از طریق شیر پلاستیکی متصل بر جداره راکتور تخلیه می شد. از روی نمونه فاضلاب تصفیه شده که طبیعتاً با دخالت فیلم های تشکیل شده بر روی منافذ بستر و همچنین لجن معلق موجود در راکتور بوده، میزان درصد حذف COD و راندمان فرآیند SND (که به نوعی معرف شوره زایی و شوره زدایی است) اندازه گیری می شد.

دمای راکتور به وسیله اجاقک الکتریکی (Roxin, HT-1900، ساخت چین) تنظیم و با استفاده از پمپ هوا و سنگ دیفیوزر (به طول ۱۲ cm، واقع در کف راکتور)، هوادهی سیستم به صورت تناوبی تأمین و با قطع پمپ هوا شرایط بی هوازی برای سیستم مهیا می شد. ایجاد شرایط هوازی و بی هوازی به طور هم زمان در یک راکتور واحد به رشد باکتری های مسئول انجام فرآیند SND کمک می نماید. مدت زمان مراحل بی هوازی و هوازی و جزئیات یک سیکل کامل راکتور در جدول (۱) آورده شده است. برای حفظ شرایط بهینه جهت رشد باکتری ها، pH در محدوده

مرکزی^۱ و طراحی باکس-بنکن معمولاً برای مطالعات بهینه سازی انتخاب می شوند. در مقایسه با روش CCD، تکنیک BBD برای ارزیابی سطوح درجه دوم به خصوص در مواردی که پیش بینی پاسخ در سطح بالا هدف مدل نیست، در نظر گرفته می شود. تکنیک BBD طراحی سه سطحی بوده و بر اساس ترکیبی از طراحی های فاکتوریال دوسطحی و بلوک ناکامل^۲ است (Myer and Montgomery 2002; Bae and Shoda 2005). روش سطح پاسخ ترکیبی از تکنیک های ریاضی و آماری است که جهت طراحی آزمایش، توسعه، بهبود و بهینه سازی یک فرآیند کمک شایانی می نماید. در سال های اخیر، در پژوهش های مختلفی استفاده موفقیت آمیز از RSM برای بهینه سازی پارامترهای عملیاتی فرآیندهای تصفیه پساب در راکتور SBR دیده می شود (Zeynali et al. 2016; Zeynali et al. 2017). (Zeynali et al. 2017). فاکتوریل و روش سطح پاسخ به بررسی اثرات تعداد همزن، میزان جامد معلق مایع مخلوط در ورودی، منبع کربنی و دما بر روی میزان حذف COD، جامد معلق کل در خروجی و شاخص حجمی لجن به کمک راکتور ناپیوسته متوالی معمولی پرداختند.

باین حال، اطلاعات برای امکان سنجی فرآیند نوین SND در تصفیه فاضلاب دامداری با راکتور ناپیوسته متوالی بستر متحرک تحت شرایط بی هوازی/هوازی تناوبی و حالت پر کردن مرحله ای و همچنین استفاده از روش سطح پاسخ برای مدل سازی و بهینه سازی سیستم کامل نمی باشد. در این پژوهش، میزان حذف COD و راندمان فرآیند SND (ESND) با استفاده از راکتور مذکور بر روی پساب دامداری و انتخاب پارامترهای مهم در عملکرد این راکتور مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت بهینه سازی فرآیند جهت حصول بهترین نتیجه در سیستم با نرم افزار طراحی آزمایش انجام پذیرفت.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- راکتور

یک راکتور ناپیوسته متوالی بستر متحرک با ابعاد قاعده ۱۶ cm × ۱۶ cm و ارتفاع ۳۵ cm بدون پارتیشن بندی از

¹ Central Composite Design (CCD)

² Incomplete Block Design

تسهیل می‌نمود. در واقع توزیع متغیر غلظت اکسیژن محلول در راکتور و بیومس موجب می‌شود تا باکتری‌های نیتروژن‌کاسیون و دنیتروژن‌کاسیون کننده به‌طور هم‌زمان رشد نمایند. لازم به ذکر است که میزان تغییرات غلظت اکسیژن محلول راکتور با استفاده از اکسیژن محلول‌سنج (مدل AZ-8403، ساخت تایوان) اندازه‌گیری می‌شد.

جدول ۱- توزیع سیکل عملیاتی راکتور

Table 1 Distribution of the operational cycle of reactor

Cycle										
Filling		[Grey]			[Grey]					
Reaction	Anaerobic	[Green]			[Green]					
	Aerobic	[Blue]			[Blue]					
Settling								[Grey]		
Decantation								[Orange]		
Idle								[Black]		
Time (min)		10	50	120	10	50	120	30	20	50

می‌شد. طی دوره تطابق‌پذیری، هیچ لجنی از راکتور تخلیه نشد. غلظت اکسیژن محلول در دوره سازگاری لجن حدود $1-1/5 \text{ mg/l}$ بوده و دمای راکتور 25°C کنترل می‌شد. در پایان هفته چهارم شرایط به حالت نسبتاً پایدار رسید و تشکیل فیلم بر روی بسترها در پایان این دوره مشهود بود.

۲-۴- روش‌های آنالیز

با اکسیژن محلول‌سنج غلظت اکسیژن محلول و دما اندازه‌گیری می‌شد. pH با استفاده از مقدار مناسبی از NaOH یا H_2SO_4 تنظیم و به‌وسیله pH‌سنج (Behine SAT2002, Iran) اندازه‌گیری شد. عملکرد حذف نیتروژن کل به‌وسیله فرآیند SND در راکتور MBSBR با E_{SND} ارزیابی و مطابق رابطه (۱) محاسبه گردید (Zhou et al. 2015):

$$E_{\text{SND}}(\%) = \left(1 - \frac{\text{NO}_x^- \text{ produced}}{\text{NH}_4^+ \text{ oxidized}}\right) \times 100 \quad (1)$$

که، NO_x^- مجموع نیترات و نیتريت بوده که به روش کروماتوگرافی یونی اندازه‌گیری شدند. همچنین غلظت نیتروژن آمونیومی NH_4^+ و COD مطابق با روش استاندارد آب و فاضلاب تعیین شدند (APHA 2005). اندازه‌گیری COD مطابق با روش رفلکس بسته و تیتراسیون بود. راندمان حذف بر اساس معادله (۲) قابل محاسبه است:

۷ الی ۸ کنترل می‌شد. در مرحله پر کردن و بی‌هوازی از همزن متشکل از موتور گیربکسی، محور تفلونی و پروانه با دور پایین (۲۵ rpm) استفاده شد. به‌منظور عدم برخورد پروانه همزن با بسترها، صفحه مشبک پلاستیکی در قسمت پایین راکتور و بالاتر از پروانه همزن نصب شد. هوای خروجی از دیفیوزر (طی مرحله هوازی) با عبور از صفحه مشبک شرایط را برای رشد باکتری‌های نیتروژن‌کاسیون

۲-۲- ویژگی‌های نمونه فاضلاب

فاضلاب تصفیه‌نشده از یک دامداری در 10 km مشهد تهیه شد. از آنجایی‌که فاضلاب خام حاوی ادرار، مدفوع، خون، آب، علوفه و سایر مواد غذایی بود، پس از ته‌نشینی به‌مدت 24 h و به کمک الک آزمایشگاهی با سایز حفره حدود 2 mm ، مواد جامد و سایر ناخالصی‌ها از آن جدا شدند. فاضلاب لازم برای آزمایش طی 2 d متوالی (و هر روز ۳ نمونه‌برداری) جمع‌آوری و برای جلوگیری از فرآیند تخریب میکروبی در داخل بطری‌های پلی‌پروپیلنی و در دمای 4°C نگهداری شدند. ترکیب فاضلاب چنین بود (mean \pm standard deviation): COD mg/l 3200 ± 400 ، نیتروژن کل (TN) $800 \pm 50 \text{ mg/l}$ ، فسفر کل (TP) $360 \pm 30 \text{ mg/l}$ ، BOD $1280 \pm 40 \text{ mg/l}$ ، جامدات معلق کل (TSS) $580 \pm 60 \text{ mg/l}$ ، pH 7.8 ± 0.4 ، Color $2/6$ (Absorbance at 287 nm) و جامدات محلول کل (TDS) $900 \pm 50 \text{ mg/l}$.

۲-۳- ویژگی‌های نمونه لجن

از مخلوط لجن تصفیه‌خانه فاضلاب خانگی و لجن مزرعه پرورش دام (با نسبت مساوی) و به میزان 2 l استفاده شد. لجن فاضلاب از واحد تصفیه فاضلاب اولنگ واقع در شرق مشهد جمع‌آوری شد. در دوره تطابق‌پذیری لجن که چهار هفته به طول انجامید، 2 l فاضلاب خام وارد راکتور و پس از اتمام یک سیکل به همان مقدار ورودی از راکتور تخلیه

است. طراحی آزمایش شامل تعداد ۱۷ آزمایش بوده که به صورت تصادفی به وسیله نرم افزار Design Expert طراحی و مطابق با ترتیب جدول (۳) انجام شدند.

جدول ۲- متغیرهای استفاده شده و سطوح آن‌ها در طراحی آزمایش

Table 2 Factors and their levels used in the experimental design

Variables	Range and levels		
	-1	0	+1
Sludge retention time (d), A	10	15	20
Temperature (°C), B	10	20	30
Aeration rate (m ³ /h), C	0.1	0.2	0.3

تجزیه و تحلیل رگرسیونی برای فیت کردن پاسخ‌ها به صورت تابعی از فاکتورها انجام می‌شود. مدل‌های درجه اول در تشریح برهم‌کنش بین پارامترها ناتوان هستند؛ بنابراین، مدل درجه دومی مانند رابطه (۳) به کار گرفته شد.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

که، Y مقدار پاسخ پیش‌بینی شده و X_i فاکتور مستقل i ام است. β_0 ، β_i ، β_{ii} و β_{ij} ضرایب رگرسیونی هستند و β_{ij} بخش ثابت، β_i بخش اثر خطی، β_{ii} بخش مربع اثر و β_{ij} بخش اثر برهم‌کنش می‌باشد.

$$R(\%) = \left(1 - \frac{Y}{Y_0}\right) \times 100 \quad (2)$$

که، Y_0 و Y به ترتیب مقادیر ابتدایی و انتهای کمیت مربوطه هستند. لازم به ذکر است که قبل از اندازه‌گیری، نمونه‌های خروجی از راکتورها پس از هر آزمایش، از کاغذ صافی (۰/۴۵ mm) عبور داده می‌شدند تا ذرات ریز و ناخالص از نمونه حذف شوند.

۲-۵- طراحی آزمایش

روش سطح پاسخ ابزاری مناسب برای توسعه مدل‌های عددی، اندازه‌گیری اثر متغیرها و انتخاب ترکیب بهینه‌ای از متغیرها است (Konwarh et al. 2013). این روش از پنج مرحله تبعیت می‌کند: (۱) انتخاب متغیرها و سطوح آن‌ها، (۲) انتخاب سطوح آزمایشی مناسب و انجام آزمایش‌ها طراحی شده آماری، (۳) توسعه یک مدل ریاضی با استفاده از آنالیز رگرسیونی داده‌های تجربی، (۴) تعیین صحت مدل و (۵) بررسی کفایت مدل (Konwarh et al. 2013; Askari et al. 2014). در این پژوهش از طراحی باکس-بنکن بر پایه سه سطح به منظور ایجاد روابط تجربی بین دو پاسخ و سه فاکتور ورودی و محاسبه میزان خطای آزمایش به کار گرفته شد. سطوح کدبندی شده و مقادیر واقعی فاکتورهای مورد بررسی در جدول (۲) نشان داده شده

جدول ۳- مقادیر آزمایش و پیش‌بینی شده برای هر نقطه طراحی

Table 3 Experimental and predicted values for each design point

Run	Variables			Responses			
	A	B	C	Y _{1,Experimental} (%)	Y _{1,Predicted} (%)	Y _{2,Experimental} (%)	Y _{2,Predicted} (%)
1	10	20	0.3	90.2	90.62	80	80.68
2	10	10	0.2	76.10	75.13	70.30	69.88
3	15	20	0.2	85	85.04	83	87.44
4	20	30	0.2	74.90	75.86	80.20	80.61
5	15	20	0.2	85.10	85.04	88	87.44
6	15	10	0.1	84.50	85.06	76.60	77.25
7	20	20	0.3	92.20	91.80	84.90	85.13
8	15	30	0.3	84.50	83.93	78	77.35
9	10	30	0.2	76	76.13	88.10	88.06
10	15	20	0.2	83	85.04	89	87.44
11	15	10	0.3	89.90	90.43	70.40	70.12
12	15	20	0.2	86.10	85.04	88	87.44
13	20	10	0.2	88	87.86	82.50	82.53
14	10	20	0.1	80.80	81.20	90.80	90.56
15	15	30	0.1	81.10	80.56	86	86.27
16	15	20	0.2	86	85.04	89.20	87.44
17	20	20	0.1	92.90	92.47	92	91.31

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- آنالیز آماری

طراحی مرکب مرکزی، باکس-بنکن و طراحی فاکتوریال سه سطحی متداول‌ترین طراحی‌های به‌کار گرفته‌شده توسط پژوهش‌گران می‌باشد. در این پژوهش، طراحی باکس-بنکن برای مطالعه تأثیر متغیرهای انتخابی بر روی پاسخ‌ها و متعاقباً بررسی بهینه‌سازی فرآیند مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها

مطابق با طراحی انجام شدند و نتایج مربوطه در جدول (۳) نشان داده شده است.

به‌وسیله آنالیز واریانس بر روی داده‌های آزمایش می‌توان به‌وسیله معادلات چندجمله‌ای، پاسخ‌ها و فاکتورها را به هم مرتبط ساخت. مدل‌های درجه دوم به‌دست‌آمده برای هر پاسخ به‌وسیله معادلات چندجمله‌ای درجه دو زیر (رابطه‌های ۴ و ۵) بیان می‌شوند. A, B و C ترم‌های مدل هستند و فاکتورهای عملیاتی پژوهش را نشان می‌دهند.

$$Y_1 = 85.04 + 3.11A - 2.75B + 2.19C - 3.25AB - 2.53AC - 5.16B^2 + 5.12C^2 \quad (۴)$$

$$Y_2 = 87.44 + 4.06B - 4.01C - 5.03AB - 8.17B^2 \quad (۵)$$

جدول ۴- نتایج ANOVA برای تابع پاسخ Y_1 و Y_2

Table 4 ANOVA results for response function Y_1 and Y_2

Responses	Source	Sum of Square	Degree of freedom	Mean Square	F-Value	p-value Prob > F
Y_1	Model	461.64	9	51.93	35.93	<0.0001
	A-SRT	77.50	1	77.50	54.28	0.0002
	B-Temp.	60.50	1	60.50	42.37	0.0003
	C-Aeration rate	38.28	1	38.28	26.81	0.0013
	AB	42.25	1	42.25	29.59	0.0010
	AC	25.50	1	25.50	17.86	0.0039
	B^2	112.00	1	112.00	78.44	<0.0001
	C^2	110.27	1	110.27	77.23	<0.0001
	Residual	9.99	7	1.43		
	Lack of fit	3.78	3	1.26	0.81	0.5501
Y_2	Pure error	6.21	4	1.55		
	Model	677.61	9	75.29	18.64	0.0004
	B-Temp.	132.03	1	132.03	32.69	0.0007
	C-Aeration rate	128.80	1	128.80	31.89	0.0008
	AB	101.00	1	101.00	25.01	0.0016
	B^2	281.05	1	281.05	69.59	<0.0001
	Residual	28.27	7	4.04		
	Lack of fit	2.40	3	0.80	0.12	0.9414
Pure error	25.87	4	6.47			

۳-۲- صحت مدل‌ها

مدل‌ها با حذف یک یا چند متغیر می‌توانند کارآمدتر شوند. ضرایب مدل‌های سطح پاسخ با p-value مربوطه در جدول (۴) آورده شده است. p-value هر بخش در مدل‌ها برای تعیین شرایط آماری معنی‌دار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مقدار بزرگ‌تر F-value و همچنین کوچک‌تر " $p > F$ ", حاکی از اهمیت ویژه مدل و ضرایب مربوطه می‌باشد. F-value مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل برای تمامی پاسخ‌ها مهم و

قابل توجه است. دقت کافی (AP)^۱ نسبت سیگنال به نویز را اندازه‌گیری می‌کند و نسبت‌های بزرگ‌تر از ۴ مطلوب هستند (Masoudi et al. 2018; Zeynali et al. 2016). با توجه به جدول (۵)، AP برای Y_1 و Y_2 به ترتیب ۱۸/۹۱۸ و ۱۳/۹۰۱ بودند. مقادیر نشان می‌دهد که AP برای مدل‌ها را می‌توان در فضای طراحی به‌کار برد. برای تأیید صحت مدل‌ها، ضریب

¹ Adequate precision (AP)

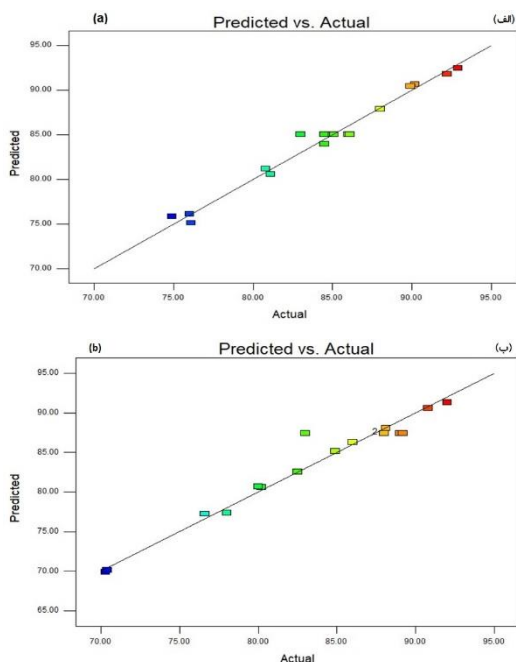
ازای ترم اضافه شده‌ای که مدل را بهبود می‌بخشد، افزایش می‌یابد (Gonen et al. 2016; Ziabari et al. 2010). مقادیر R_{Adj}^2 (۰/۹۵۱۶ و ۰/۹۰۸۵) برای دو مدل نشان می‌دهد که فقط ۰/۴۸۴ و ۰/۰۹۱۵ از تغییرپذیری کل به وسیله مدل قابل توصیف نیست. ضریب واریانس (CV) به عنوان نسبت خطای استاندارد تخمینی به مقدار متوسط پاسخ مشاهده شده تعریف می‌شود. مدل‌های با ضریب واریانس بزرگ‌تر از ۱۰٪ تجدید پذیر در نظر گرفته می‌شوند (Masoudi et al. 2018). ضرایب واریانس پژوهش برای پاسخ‌ها کم‌تر از ۱۰ درصد بودند.

جدول ۵- آنالیز آماری نتایج برای پارامترهای پاسخ

Table 5. Statistical analysis of results for response parameters

Response	p-value	R^2	R_{Adj}^2	R_{Pred}^2	CV%	AP	PRESS ^a
Y ₁	<0.0001	0.9788	0.9516	0.8511	1.41	18.918	70.23
Y ₂	0.0004	0.9600	0.9085	0.8884	2.41	13.901	78.79

^a Predicted residual error sum of square



شکل ۲- نمودار رگرسیونی داده واقعی برحسب مقادیر پیش‌بینی شده: الف- درصد حذف COD و ب) راندمان SND

Fig. 2 Regression plots of the actual data against the predicted values: a) COD removal (%) and b) SND efficiency

شکل (۳) نمودارهای سه‌بعدی سطح پاسخ را برای درصد حذف COD به صورت تابعی از متغیرهای

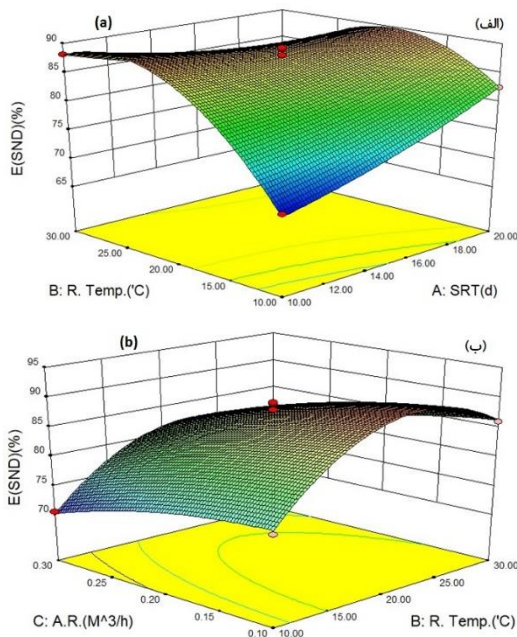
تعیین R^2 موردبررسی قرار می‌گیرد. R^2 معیار آماری از چگونگی فیت بودن داده‌های تجربی با مدل است و همچنین نشان‌دهنده نسبت تغییرپذیری کل است که به وسیله مدل رگرسیونی توضیح داده می‌شود (Gonen et al. 2016). باین حال، هنگامی که ترم جدیدی به مدل اضافه می‌شود، R^2 افزایش می‌یابد صرف‌نظر از این که ترم اضافه شده به لحاظ آماری مهم باشد یا خیر (Ziabari et al. 2010). از این رو، فرم تعدیل شده R^2 (R_{Adj}^2) تعریف می‌شود که سنجش دقیق‌تری از R^2 است. R_{Adj}^2 پارامتر مهم‌تری برای مقایسه مدل‌ها با تعداد متفاوت ترم‌هاست، زیرا فقط به

به‌طور معمول، باید مشخص شود آیا مدل انتخابی تقریب کافی را برای سیستم واقعی فراهم می‌کند یا خیر. بدین منظور می‌توان از نمودارهای خطایاب استفاده کرد. شکل (۲) نمودارهای مقدار پیش‌بینی شده برحسب واقعی را برای هر دو پاسخ نشان می‌دهد. به کمک این نمودار می‌توان مقدار یا گروهی از مقادیر که به راحتی به وسیله مدل، پیش‌بینی نمی‌شوند را تشخیص داد زیرا داده‌ها باید حول خط 45° باشند. پراکندگی منظم داده‌های حاصل از آزمایش حاکی از معتبر بودن مدل انتخابی و قابلیت آن در پیش‌بینی نقاط آزمایش است.

۳-۳- آنالیز عملکرد راکتور

پس از انجام تمامی آزمایش‌ها، با وارد کردن داده‌های پاسخ در نرم‌افزار، از بخش Analysis می‌توان نتایج را تحلیل کرد. همچنین برای نمایش ساده‌ای از چگونگی اثر متغیرهای مستقل بر پاسخ یا متغیر خروجی می‌توان از نمودارهای سه‌بعدی و کانتور بهره جست. با توجه به جدول (۴) و مقادیر p-value متغیرهای مستقل، مشخص است که A، B، C، AB، AC، B² و C² به عنوان متغیرهای مهم در حذف COD می‌باشند.

واریانس برای راندمان فرآیند SND آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل درجه دوم انتخاب شده، مدل مناسبی بوده و فاکتورهای B^2 (توان دوم دما)، دما، سرعت هوادهی و برهم‌کنش بین A و B به‌عنوان مهم‌ترین متغیر عملیاتی بر راندمان فرآیند SND هستند. شکل (۴) تأثیر متغیرها بر راندمان فرآیند SND را نشان می‌دهد.



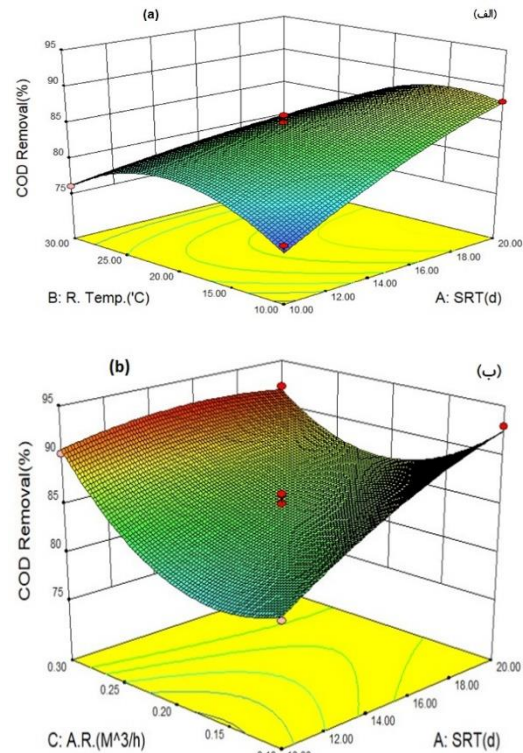
شکل ۴- نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی تأثیر: الف)- زمان ماند دما و ب)- دما و سرعت هوادهی بر روی راندمان فرآیند SND لجن

Fig.4 Three-dimensional response surface plot for the effect of: a) SRT and temperature, and b) temperature and aeration rate on SND efficiency

۳-۱-۳-۳- تأثیر SRT

همان‌طور که در شکل‌های (الف)-(۳) و (۴) مشاهده می‌شود، با افزایش SRT راندمان‌های Y_1 و Y_2 با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. بهترین عملکرد راکتور در SRT برابر ۲۰ d (آزمایش ۱۷) به‌دست آمد. SRT طولانی می‌تواند شوره‌سازی را به‌علت افزایش و بهبود زیست‌توده و حفظ و ماند بهتر خرده‌زیست‌مندهای با رشد آهسته، تقویت کند. در یک بیوراکتور غشایی جهت تصفیه پساب شهری، بالاترین راندمان حذف نیترژن کل به‌وسیله فرآیند SND با SRT برابر d ۴۰ به دست آمد و با کاهش SRT به ۲۰ d راندمان کاسته شد (Holakoo et al. 2007). تحت برخی از

مستقل نشان می‌دهد. در این نمودارها، دو متغیر مستقل در محدوده طراحی آزمایش تغییر می‌کنند درحالی‌که دیگر متغیر عددی با پیش‌فرض نرم‌افزار در حد وسط محدوده طراحی ثابت است.



شکل ۳- نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی تأثیر: الف)- زمان ماند لجن دما و ب)- زمان ماند لجن و سرعت هوادهی بر روی درصد حذف COD

Fig. 3 Three-dimensional response surface plot for the effect of: a) SRT and temperature, b) SRT and aeration rate on COD removal (%)

درصد حذف COD یکی از مهم‌ترین موارد در بررسی عملکرد تصفیه می‌باشد. هرچه درصد حذف COD بیشتر باشد، توانایی راکتور در حذف مواد آلی بیشتر و میزان مواد آلی در پساب تصفیه‌شده کمتر خواهد بود. درصد حذف COD از ۷۴/۹ درصد تا ۹۲/۹ درصد تغییر داشته و میانگین آن برای ۱۷ آزمایش انجام‌گرفته ۸۴/۴ درصد بوده است.

تحلیل نتایج جدول (۳) با توجه به شرایط کاملاً متفاوت انجام هر آزمایش به‌تنهایی امکان‌پذیر نمی‌باشد و باید به‌وسیله نرم‌افزار انجام شود. نتیجه تجزیه و تحلیل جدول داده‌های تجربی منجر به جدول آنالیز واریانس می‌شود. در جدول (۴) نتایج آنالیز

نیاز است در محدوده طراحی آزمایش بهینه‌سازی انجام گیرد (مهم بودن پارامتر B^2). جمعیت میکروبی و ترکیبات غشای سلولی در دماهای مختلف تغییر می‌کند. بدین ترتیب درجه حرارت اثرات پیچیده در واکنش‌های بیوشیمیایی ایجاد می‌کند. به نظر می‌رسد زمان واکنش طولانی‌تر برای عملیات IA-MBSBR در دماهای پایین کارآمدتر باشد.

۳-۳-۲- تاثیر سرعت هوادهی

بیش‌ترین راندمان Y_1 و Y_2 تحت سرعت هوادهی $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ به دست آمد اما متوسط راندمان Y_1 و Y_2 با سرعت هوادهی 0.3 و $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ به ترتیب با مقدار $0.89/2$ و $0.86/35$ بهترین عملکرد سیستم را نشان دادند. بالاترین E_{SND} با کم‌ترین مقدار غلظت $NO_x^- - N$ (مجموع نیتروژن نیتروژن و نیتروژن نیتراتی به‌عنوان محصولات میانی فرآیند SND) به دست آمد. غلظت بالای اکسیژن محلول سرعت شوره‌سازی را افزایش داده و فرآیند شوره‌زدایی را بازمی‌دارد که این سبب تجمع نیتريت و نیترات در راکتور می‌شود. از سوی دیگر، در غلظت‌های پایین اکسیژن محلول، فرآیند شوره‌سازی کاهش یافته و فرآیند شوره‌زدایی افزایش می‌یابد. بنابراین، میزان اکسیژن محلول یک عامل مهم برای رخداد فرآیند SND می‌باشد؛ که به‌منظور تعادل بین شوره‌سازی و شوره‌زدایی باید در یک مقدار مناسب حفظ شود. استفاده از هوادهی تناوبی و در نتیجه ایجاد گرادیان اکسیژن در میان زیست‌توده، انجام فرآیند SND داخل بیوفیلم‌های میکروبی و لخته‌ها فراهم می‌کند. در واقع توزیع نابرابر غلظت اکسیژن در زیست‌توده، اجازه تکثیر باکتری‌های نیترات‌زا و نیترات‌زدا را فراهم می‌نماید. غلظت اکسیژن محلول و دسترسی به منبع کربن برای شوره‌زدایی به‌منظور شروع فرآیند SND پارامترهای مهم گزارش شدند (Pochana and Keller 1999).

۳-۳-۴- بهینه‌سازی

با استفاده از تابع بهینه‌سازی عددی روش سطح پاسخ می‌توان برای متغیرها و پاسخ مقدار مطلوبی (بیشینه، کمینه، هدف، در محدوده و مساوی با) را تعریف کرد. در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار Design

شرایط نامناسب آزمایش، راندمان فرآیند SND تقلیل یافت که نشان‌دهنده تجمع $NO_3^- - N$ و $NO_2^- - N$ در سیستم می‌باشد. در فرآیند SND تعادل سرعت‌های شوره‌سازی و شوره‌زدایی منجر به تولید کم‌تر محصولات میانی شده و نتیجه آن راندمان بالای فرآیند خواهد بود. تحت شرایط دمایی بالا، SRT طولانی‌چندان برای راندمان‌های Y_1 و Y_2 کارساز نبود. مطالعات قبلی نشان می‌دهد حذف نیتروژن و کربن همواره با SRT متناسب نیست. SRT خیلی طولانی ممکن است فروپاشی لخته را - به‌ویژه تحت شرایط دمایی بالا- تسریع بخشد (Holakoo et al. 2007). در این مطالعه SRT طولانی برای پایدار نگه‌داشتن عملکرد تصفیه زیستی پساب تحت شرایط دمایی پایین مطلوب ارزیابی شد (مهم شدن پارامتر AB) طوری که افزایش سن لجن را می‌توان راهی ایده‌آل برای جبران اثرات نامطلوب دمای پایین مطرح کرد.

۳-۳-۲- تاثیر دما

یکی از پارامترهای محیطی مهم فرآیند تصفیه زیستی پساب، دما است که نه تنها بر فعالیت متابولیک جمعیت میکروبی اثر می‌گذارد، بلکه اثرات عمیقی روی فاکتورهایی مانند سرعت‌های انتقال گاز و خواص ته‌نشینی لجن بیولوژیک دارد. در این پژوهش، بالاترین راندمان‌های Y_1 و Y_2 در دمای 20°C حاصل شد. سرعت واکنش‌های زیستی با بالا رفتن دما افزایش می‌یابد تا اینکه به یک دمای بهینه برسد، بالاتر از دمای بهینه پروتئین‌های آنزیمی تغییر ماهیت داده و سرعت‌ها کاهش می‌یابد (Metcalf and Eddy 2003; Karkman et al. 2011). در دمای 10°C ، راندمان‌های Y_1 و Y_2 پایین‌ترین مقدار بودند و افزایش زمان ماند لجن تحت این شرایط موجب بهبود راندمان‌ها می‌شد. تحت شرایط دمایی پایین، باکتری‌های نیتریفای کننده اتوتروف عملاً عملکردشان کاهش می‌تواند (Metcalf and Eddy 2003). با صعود دما به 20°C عملکرد سیستم بهبود یافت. وجود یک پیک یا اوج در تغییر راندمان با متغیرها نشان می‌دهد برای دستیابی به ماکزیمم راندمان حذف

Expert 8.0.2 مقادیر ورودی مطابق محدوده مورد بررسی انتخاب شدند درحالی که پاسخ‌ها برای دستیابی به بیشینه مقدار، طراحی شده بودند. بهترین حالت عملیاتی و نتایج پیش‌بینی شده حاصل از بهینه‌سازی با مطلوبیت ۰/۹۸ در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- شرایط بهینه برای روش سطح پاسخ

Table 6 Optimum condition for the response surface methodology

Solution no.	SRT (d)	Temp. (°C)	A.R. (m ³ /h)	Y ₁	Y ₂	Desirability
1	20	19.16	0.10	92.9001	91.298	0.984
2	20	19.00	0.10	92.9002	91.2825	0.983
3	20	18.76	0.10	92.9	91.2498	0.983
4	19.88	18.96	0.10	92.9	91.206	0.982

۱- استفاده از این سیستم بسیار مفید بوده و ارزش اقتصادی دارد.

۲- به‌وسیله آنالیز واریانس (ANOVA) تناسب رضایت بخشی بین مدل رگرسیونی درجه دوم و نتایج آزمایشگاهی یافت شد که نشان از توافق خوب بین درصد راندمان‌های پیش‌بینی‌شده و نتایج واقعی به‌دست‌آمده می‌باشد.

۳- با استفاده از تابع بهینه‌سازی عددی بیش‌ترین درصد حذف COD و راندمان فرآیند SND (بالای ۹۲ درصد) تحت شرایط زمان‌ماند لجن ۲۰ d، دمای ۱۹/۱۶ و سرعت هوادهی ۰/۱ m³/h به‌دست آمد.

۴- راکتور ناپیوسته متوالی بستر متحرک یک فرآیند ساده و کارآمد جهت تصفیه پساب‌های دامداری بوده که با روش‌های بهینه‌سازی مناسب می‌توان به راندمان بالا و هزینه عملیاتی کم‌تر دست‌یافت.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از تلاش‌های ارزشمند جناب آقای دکتر درودی و مدیریت آزمایشگاه شیمی تجزیه دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد جناب آقای دکتر چمساز تشکر و قدردانی می‌نمایند.

یک آزمایش اضافی تحت شرایط ۲ بهینه انجام پذیرفت. برای بررسی دقیق‌تر، غلظت‌ها در راکتور هر ساعت اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که غلظت-های NO_x^- و $NH_4^+ - N$ در راکتور بعد از ۸ h به مقدار زیادی کاهش یافتند که منجر به راندمان بالای حذف نیترژن کل یعنی ۹۲/۸٪ شد. در دو مرحله هوادهی، آمونیوم به‌طور تقریباً کامل اکسید شد و تجمع NO_2^- به مقدار کمی بود. در مراحل بدون هوادهی، نیترات و نیتريت به‌طور مؤثری حذف شدند. این نشان می‌دهد که در شرایط بی‌هوای با توجه به حضور مواد کربنی به دلیل پر کردن مرحله‌ای، دستیابی به سرعت بالای شوره‌زدایی امکان‌پذیر است. در آزمایش اضافی، مقادیر Y_1 و Y_2 تحت شرایط ۲ بهینه‌سازی به ترتیب ۹۳/۴ و ۹۲/۸٪ به‌دست آمدند.

۴- نتیجه‌گیری

راکتور ناپیوسته متوالی بستر متحرک تحت فرآیند شوره‌سازی-شوره‌زدایی به‌طور هم‌زمان با هوادهی تنوایی و پر کردن مرحله‌ای، جهت تصفیه پساب دامداری به‌کار گرفته شد. طراحی آزمایش و بهینه‌سازی از طریق روش سطح پاسخ برای درصد حذف COD و راندمان فرآیند SND تحت تأثیر متغیرهای زمان‌ماند لجن، دما و سرعت هوادهی انجام شد. نتایج نشان داد که:

References

- Al-Rekabi W. S., Qiang H. and Qiang W. W. (2007). Review on sequencing batch reactors. Pak. J. Nutr., 6(1), 11-19.
- APHA. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st Edition, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC.

- Askari M., Rezaei B., Shoushtari A. M., Noorpanah P., Abdouss M. and Ghani M. (2014). Fabrication of high performance chitosan/polyvinyl alcohol nanofibrous mat with controlled morphology and optimised diameter. *Can. J. Chem. Eng.* 92(6), 1008–1015.
- Azimi S. C., Shirini F. and Pendashteh A. (2019). Evaluation of COD and turbidity removal from woodchips wastewater using biologically sequenced batch reactor. *Process Saf. Environ. Prot.* 128, 211-227.
- Bae S. and Shoda M. (2005). Statistical optimization of culture conditions for bacterial cellulose production using Box Behnken design. *Biotechnol. Bioeng.*, 90(1), 20–28.
- Ferreira F. L. A. Lucas J. D. and Amaral L. A. D. (2003). Partial characterization of the polluting load of swine wastewater treated with an integrated biodigestion system. *Bioresour. Technol.*, 90(2), 101–108.
- Gönen S. O., Taygun M. E. and Küçükbayrak S. (2016). Evaluation of the factors influencing the resultant diameter of the electrospun gelatin/sodium alginate nanofibers via Box–Behnken design. *Mater. Sci. Eng.* 58, 709–723.
- Holakoo L., Nakhla G., Bassi A. S. and Yanful E. K. (2007). Long term performance of MBR for biological nitrogen removal from synthetic municipal wastewater. *Chemosphere*, 66(5), 849–857.
- Juteau P., Tremblay D., Ould-Moulaye C. B., Guy Bisailon J. and Beaudet R. (2004). Swine waste treatment by self heating aerobic thermophilic bioreactors. *Water Res.* 38(3), 539–546.
- Karkman A., Mattila K., Tamminen M. and Virta M. (2011). Cold temperature decreases bacterial species richness in nitrogen-removing bioreactors treating inorganic mine waters. *Biotechnol. Bioeng.*, 108(12), 2876–2883.
- Keller J., Subramaniam K., Gosswein J. and Greenfield P. F. (1997). Nutrient removal from industrial wastewater using single tank sequencing batch reactor. *Water Sci. Technol.*, 35(6), 137–144.
- Konwarh R., Misra M., Mohanty A. K. and Karak N. (2013). Diameter-tuning of electrospun cellulose acetate fibers: a Box–Behnken design (BBD) study. *Carbohydr. Polym.* 92(2), 1100-1106
- Kulkarni P. (2013). Nitrophenol removal by simultaneous nitrification denitrification (SND) using *T.pantotropha* in sequencing batch reactors (SBR). *Bioresour. Technol.* 128, 273–280.
- Lee H. and Shoda M. (2008). Removal of COD and color from livestock wastewater by the Fenton method. *J. Hazard. Mat.*, 153(3), 1314–1319.
- Li J., Healy M. G., Zhan X., Norton D. and Rodgers M. (2008). Effect of aeration rate on nutrient removal from slaughterhouse wastewater in intermittently aerated sequencing batch reactors. *Water Air Soil Pollut.*, 192(1-4), 251–261.
- Lim J. W., Seng C. E., Lim P. E., Ng S. L. and Ahmad Sujari A. N. (2011). Nitrogen removal in moving bed sequencing batch reactor using polyurethane foam cubes of various sizes as carrier materials. *Bioresour. Technol.*, 102(21), 9876–9883.
- Masoudi S. M. A., Hedayati Moghadam A., Sargolzaei J., Darroudi A. and Zeynali V. (2018). Investigation and optimization of the SND–SBR system for organic matter and ammonium nitrogen removal using the central composite design. *Environ. Prog. Sustain. Energy*, 37(5), 1638-1646.
- Metcalf and Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill, New York.
- Mojiri A., Ohashi A., Ozaki N. and Kindaichi T. (2018). Pollutants removal from synthetic wastewater by the combined electrochemical, adsorption and sequencing batch reactor (SBR). *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 161, 137-144.
- Murat Hocaoglu S., Insel G., Ubay Cokgor E. and Orhon D. (2011). Effect of low dissolved oxygen on simultaneous nitrification and denitrification in a membrane bioreactor treating black water. *Bioresour. Technol.*, 102(6), 4333–4340.
- Myer R. H. and Montgomery D. C. (2002). Response surface methodology: process and

- product optimization using designed experiment. John Wiley and Sons, New York.
- Neczaj F., Kacprzak M., Kamizela T., Lach J. and Okoniewska F. (2008). Sequencing batch reactor system for the co-treatment of landfill leachate and dairy wastewater. *Desal.*, 222(1-3), 404–409.
- Othman I., Anuar A., Ujang Z., Rosman N. H., Harun H. and Chelliapan S. (2013). Livestock wastewater treatment using aerobic granular sludge. *Bioresour. Technol.*, 133, 630–634.
- Pochana K. and Keller J. (1999). Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND). *Water Sci. Technol.* 39(6), 61–68.
- Ros M. and Vrtovsek J. (2008). Industrial and municipal wastewater treatment in the sequencing batch reactor. *Kem. Ind.*, 57(10), 459–463.
- Singh M. and Srivastava R. K. (2010). Sequencing batch reactor technology for biological wastewater treatment: a review. *Asia-Pac. J. Chem. Eng.*, 6(1), 3-13.
- Uygur A. and Kargi F. (2004). Biological nutrient removal from pre-treated landfill leachate in a sequencing batch reactor. *J. Environ. Manage.*, 71(1), 9–14.
- Wang J. and Wan W. (2009). Experimental design methods for fermentative hydrogen production: a review. *Int. J. Hydrogen Energy*, 34(1), 235–244.
- Yang P. Y., Chen H. J. and Kim S. J. (2003). Integrating entrapped mixed microbial cell (EMMC) process for biological removal of carbon and nitrogen from dilute swine wastewater. *Bioresour. Technol.*, 86(3), 245–252.
- Yang S., Yang F., Fu Z., Wang T. and Lei R. (2010). Simultaneous nitrogen and phosphorus removal by a novel sequencing batch moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment. *J. Hazard. Mat.*, 175(1-3), 551–557.
- Zeynali V., Sargolzaei J. and Hedayati Moghadam A. (2016). Optimization of several hydrodynamic and non-hydrodynamic operating parameters in treatment of synthetic wastewater containing wheat starch in a sequencing batch reactor (SBR) using response surface methodology. *Desalin. Water Treat.*, 57(51), 24240-24256.
- Zeynali V., Sargolzaei J., Hedayati Moghadam A. and Masoudi S. M. A. (2017). Implication of statistical design approach methodology for optimization of COD removal, effluent quality, and biosludge settling properties in aerobic bioreactors. *Environ. Prog. Sustain. Energy*, 36(5), 1428-1438.
- Zhang L., Zheng P., Tang C. and Jin R. (2008). Anaerobic ammonium oxidation for treatment of ammonium-rich wastewaters. *J. Zhejiang Univ. Sci. B*, 9(5), 410-426.
- Zhou X., Han Y. and Guo X. (2015). Identification and evaluation of SND in a full-scale multi-channel oxidation ditch system under different aeration modes. *Chem. Eng. J.*, 259, 715–723.
- Ziabari M., Mottaghitlab V. and Haghi A. K. (2010). A new approach for optimization of electrospun nanofiber formation process. *Korean J. Chem. Eng.*, 27(1), 340–354.

Performance evaluation of moving-bed SBR for livestock wastewater treatment by SND process

Seyed Mohammad Ali Masoudi^{*1}, Javad Sargolzaei², Fatemeh Sabeti Dehkordi¹ and Vahid Zeynali³

¹Alumni, M.Sc., Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

²Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³Ph.D. Scholar, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

*Corresponding author: a.masoudi2010@stu.um.ac.ir

Original Paper

Received: October 06, 2019

Revised: November 24, 2019

Accepted: November 31, 2019

Abstract

In this study, the performance of moving-bed sequencing batch reactor with intermittent aeration strategy (IA-MBSBR) was evaluated for treatment of livestock wastewater in simultaneous nitrification-denitrification process. The statistical design and analysis were employed to optimize independent variables such as sludge retention time (SRT), temperature, and aeration rate using response surface methodology (RSM) through Box-Behnken design (BBD). The effect of variables was investigated on chemical oxygen demand (COD) removal and SND efficiency (E_{SND}). The analysis of variance (ANOVA) was conducted to confirm the suitability and significance of the quadratic models. Based on the results, a very high regression coefficient was achieved between the variables and the responses: COD removal and SND efficiency were $R^2 = 0.9788$ and $R^2 = 0.9600$, respectively indicating an excellent evaluation of experimental data by polynomial regression model. Long SRT reduced the negative effect of low temperature, but lowered COD removal and E_{SND} in high temperature. Further, appropriate aeration rate was vital for the SND to reach equilibrium between the nitrification and denitrification processes. The optimal conditions obtained from the models were SRT= 20 d, temperature = 19.16 °C and aeration rate= 0.1m³/h, which results in COD removal and E_{SND} of 92.9 and 91.3%, respectively. It was found that an alternating anaerobic/aerobic conditions with step-filling mode is an effective, economic, and environmentally-friendly strategy for the biological treatment of livestock wastewater in the moving-bed sequencing batch reactor.

Keywords: COD Removal; Intermittent Aeration; Livestock Wastewater; Moving-bed Reactor; Simultaneous Nitrification and Denitrification.