

## بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر تصفیه فاضلاب توسط راکتور ناپیوسته متوالی

سید محمدعلی مسعودی<sup>۱</sup>، جواد سرگلزایی<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل درودی<sup>۲</sup>

۱. مشهد، دانشگاه فردوسی، دانشکده مهندسی

۲. مشهد، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، دانشکده ثامن الحجج

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۱۱ - تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۰۱)

### چکیده

به دلیل رشد جمعیت و فعالیت‌های انسانی در بخش‌های کشاورزی و صنعت، آب سالم و بهداشتی دچار کمبود شده است. صنعت تولید نشاسته یکی از صنایع آلاینده منابع آبی است که با توجه به زیادبودن بار آلودگی، مضرات زیست‌محیطی و استانداردهای خروجی پساب، تصفیه و بازیابی آن‌ها اهمیت دارد. در این تحقیق، پس از ساخت راکتور ناپیوسته متوالی (اس بی آر)، اثر متغیرهای دما، عمق هوادهی، تفاوت در میزان سازگاری لجن به ماده آلی (نشاسته) و سرعت بارگذاری ماده آلی (او ال آر) بر بازده راکتور بررسی شد. آزمایش‌ها با نرم‌افزار دیزاین اکسپرت طراحی شدند و در راکتورهای SBR<sub>۱</sub> و SBR<sub>۲</sub> که به ترتیب با ۵۰۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر ماده آلی تطابق یافته بودند، انجام گرفتند. میزان حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (سی او دی) به عنوان پاسخ فرایند اندازه‌گیری شد. براساس نتایج، پاسخ آزمایش‌ها با مدل پیش‌بینی شده در تطابق بود. در دمای ۲۵°C راندمان حذف بالا و به‌طور متوسط ۸۵/۶ درصد بود. متوسط راندمان حذف سی او دی در SBR<sub>۲</sub>، ۱۲ درصد بیشتر از SBR<sub>۱</sub> بود. بازده راکتورها در هوادهی عمقی نسبت به هوادهی میانی و سطحی بیشتر بود. در شرایط بهینه، راندمان حذف سی او دی به ۹۶/۳۶ درصد رسید. براساس نتایج، راکتور ناپیوسته متوالی گزینه مناسبی برای تصفیه فاضلاب حاوی نشاسته است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز واریانس، تصفیه فاضلاب، راکتور ناپیوسته متوالی، روش سطح پاسخ، نشاسته.

### ۱. مقدمه و هدف

به مجموعه آب‌های دورریختنی حاصل از فعالیت‌های انسانی که منشأ خانگی، صنعتی یا کشاورزی دارد، فاضلاب گفته می‌شود. به‌منظور تأمین شرایط بهداشتی برای زندگی، پاک نگهداری محیط‌زیست، بازیابی فاضلاب و استفاده مجدد از آن برای مصارف کشاورزی و تولید کود طبیعی به‌واسطه حضور ترکیبات شیمیایی مانند نیترات‌ها و فسفات‌ها، تصفیه فاضلاب‌ها امری ضروری است [۱]. روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی برای تصفیه فاضلاب وجود دارد. فرایندهای بیولوژیکی به‌منظور حذف مواد آلی هزینه کمتری نسبت به روش‌های فیزیکی- شیمیایی دارند [۲]. راکتورهای مختلفی برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی مواد آلی از جمله

نشاسته وجود دارد؛ مانند راکتور بی‌هوازی گرانولی بالارو<sup>۱</sup> [۳]، راکتورهای بافل‌دار بی‌هوازی<sup>۲</sup> [۴]، راکتورهای زیستی بستر سیالی<sup>۳</sup> [۵] و استخر بی‌هوازی<sup>۴</sup> [۶]. در شرایط هوازی و بی‌هوازی، تجمعات میکروبی متنوع در یک راکتور رشد می‌کنند و مواد آلی را حذف می‌کنند.

راکتورهای ناپیوسته متوالی (اس بی آر)<sup>۵</sup> یک حالت پروخالی کردن از فرایند لجن فعال در نظر گرفته می‌شوند. این نوع از راکتورهای ناپیوسته در دوره‌هایی که چرخه اس بی آر را تشکیل می‌دهند، راه‌اندازی می‌شوند. درکل، هر چرخه شامل دوره‌های پرکردن، واکنش، ته‌نشینی، تخلیه و سکون است. با استفاده از تناوب دوره‌های بی‌هوازی و هوازی طی چرخه تصفیه، می‌توان به حذف بیولوژیکی مواد مغذی و آلی

چرخه راکتور به بازده بالایی در حذف سی او دی دست یافتند، در کمترین سرعت هوادهی (۲۰ لیتر در ساعت) زمان مورد نیاز برای تجزیه سی او دی بیشتر بود [۱۸]. داوری و همکاران در تحقیقات خود در یک راکتور ناپیوسته متوالی ۲/۵ لیتری نشان دادند فرایندهای نیتریفیکاسیون جزئی، اکسیداسیون بی‌هوازی آمونیوم و دنیتریفیکاسیون همزمان (اس ان آ دی) برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی آلایندهای نیتروژنی زیاد و سی او دی کم مناسب است. در پایان دوره، سامانه می‌توانست ۷۹ درصد سی او دی را حذف کند [۱۹]. تکدستان و همکاران در زمان ماند سلولی ده روز به راندمان حذف سی او دی تقریباً ۹۵ درصد رسیدند. با افزایش زمان ماند سلولی به ۲۵ روز، به دلیل رشد باکتری‌های رشته‌ای، تهنشینی لجن به خوبی انجام نگرفت و به ۲۴۰ میلی‌لیتر در گرم رسید که چندان مطلوب نبود [۲۰]. در بررسی سامانه ترکیبی راکتور ناپیوسته متوالی با کربن فعال گرانول در تصفیه فاضلاب با بار آلودگی بالا، بیشترین و کمترین متوسط بازدهی حذف سی او دی به ترتیب در راکتورهای با غلظت کربن فعال ۲۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و راکتور بدون کربن فعال به دست آمد [۲۱].

در این تحقیق، تصفیه بیولوژیکی فاضلاب حاوی نشاسته با استفاده از فناوری راکتور ناپیوسته متوالی، میکروارگانیسم‌های کود گاو و همچنین تأثیر برخی از متغیرهای عملیاتی مهم بر بازده راکتور - که به ندرت در پژوهش‌ها دیده شده است - بر اساس طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ بررسی شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

روند انجام دادن این تحقیق عبارت است از: ۱. ساخت راکتور ناپیوسته متوالی، ۲. تطابق پذیری لجن حاصل از شیرابه کود گاو، ۳. در نظر گرفتن متغیرهای ورودی جدید و طراحی آزمایش به کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، ۴. انجام دادن آزمایش‌ها مطابق با شرایط طراحی آزمایش و تحلیل نتایج. در ادامه، به صورت مفصل به جزئیات مراحل اجرای تحقیق اشاره می‌شود.

### ۱.۲. شرایط راکتور

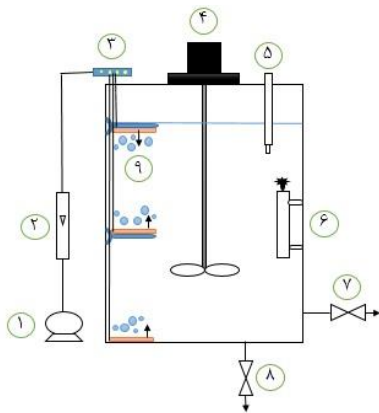
دو راکتور ناپیوسته متوالی به حجم کل ۱۶ لیتر (ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و قاعده ۲۰×۲۰ سانتی‌متر مربع) از جنس شیشه طراحی و ساخته شدند. شکل ۱ نمایی از اس بی آر ساخته شده را نشان می‌دهد. لجن دو راکتور با میزان سی او دی متفاوت (نشاسته)، دوره سازگاری را گذراندند. هوادهی راکتورها با

دست یافت. با توجه به دستورالعمل‌های عملیاتی مورد نظر، می‌توان دو یا چرخه‌های بیشتری را در روز انجام داد [۷]. با توجه به هزینه اندک ساخت، قابلیت تصفیه انواع فاضلاب و نیاز به فضای کم، بازده بالا و انعطاف پذیری زیاد، برای تصفیه فاضلابها به این راکتور توجه شده است [۸].

روش‌های متعددی برای بهبود فرایندها مطرح شد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، روش طراحی آزمایش است. طراحی آزمایش روشی است که برای تعیین ارتباط بین عوامل مؤثر بر یک فرایند و خروجی‌های آن فرایند استفاده می‌شود [۹]. در کل، استفاده از طراحی آزمایش‌ها به دلیل کاهش هزینه عملیاتی، بهینه کردن کیفیت و بازده فرایند، غربال کردن متغیرها و قابل قبول بودن نتایج اهمیت ویژه‌ای دارد [۱۰]. از جمله روش‌های مهم در طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ است. مزیت مهم این روش، کاهش تعداد آزمایش‌های تجربی مورد نیاز برای ارزیابی پارامترهای متعدد و اثر متقابل آن‌هاست [۱۱، ۱۲]. این روش برای توسعه فناوری‌های مناسب تصفیه آب مفید است و در شناسایی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر فرایند حذف به کار گرفته می‌شود [۱۳، ۱۴].

گوهری و همکاران [۱۵] گزارش دادند با استفاده از میکروارگانیسم‌های لجن تصفیه‌خانه فاضلاب و در شرایط بهینه سه مرتبه خوراک‌دهی طی یک چرخه اس بی آر و سی او دی ورودی میلی‌گرم در لیتر ۵۰۰، فاضلاب حاوی نشاسته را می‌توان تا حدود ۹۱/۲ درصد تصفیه کرد. زینلی و همکاران استفاده از طراحی آزمایش در بهینه‌سازی حذف نشاسته از فاضلاب سنتزی با استفاده از اس بی آر را بررسی کردند [۱۶]. آن‌ها دریافتند افزایش در زمان ماند هیدرولیکی به افزایش راندمان حذف سی او دی منجر می‌شود و با کاهش زمان ماند هیدرولیکی و افزایش سی او دی، شاخص حجمی لجن (اس وی ای)<sup>۱</sup> کاهش می‌یابد. همچنین، برهم‌کنش بین متغیرهای سی او دی ورودی و میزان اکسیژن عامل مهمی در رشد باکتری‌ها و میزان اس وی ای است. هدایتی و همکاران [۱۷] استفاده از فناوری غشایی و طراحی آزمایش به روش فاکتوریل را در تصفیه فاضلاب حاوی نشاسته مثبت ارزیابی کردند. همچنین، مدل برازش‌شده مناسبی را ارائه دادند که مقادیر پیش‌بینی‌شده حاصل از آن به مقادیر تجربی نزدیک بود. هو و همکاران در سرعت هوادهی ۱۶۰ لیتر در ساعت، به دلیل کاهش سریع غلظت سی او دی در ابتدای

میلی لیتر در لیتر محلول حاوی میکروالمنت‌های ضروری برای رشد باکتری‌ها به سایر ترکیبات فاضلاب سنتزی اضافه شدند. محلول حاوی میکروالمنت‌ها شامل (گرم در لیتر) کلرید آن شش آب ۱/۵، یدور پتاسیم ۱/۲، اسید بوریک ۰/۱۵، کلرید منگنز چهار آب ۰/۱۲، سولفات روی هفت آب ۰/۱۵ و سولفات مس پنج آب ۰/۰۵ بود. در اوایل دوره تطابق پذیری، ته‌نشینی باکتری‌ها به خوبی انجام نمی‌گرفت و اس وی آی کاهش چشمگیری نداشت. متوسط اس وی آی دو راکتور در پنج روز ابتدایی در محدوده ۴۲۲-۴۵۶ میلی لیتر بر گرم بود. پس از حدود ۲۸ روز از شروع تطابق‌پذیری، میکروارگانیسم‌ها به شرایط تقریباً یکنواخت و پایداری رسیدند. در پایان این دوره، خصوصیات بذر لجن مانند اس وی آی، غلظت مواد معلق مایع مخلوط<sup>۳</sup> و مواد معلق فرار مایع مخلوط<sup>۴</sup> در راکتورها به ترتیب حدود ۹۰-۱۰۰ میلی لیتر بر گرم، ۴۵۰۰-۴۸۰۰ میلی گرم در لیتر و ۳۳۷۵-۳۴۵۶ میلی گرم در لیتر بود. همچنین، رنگ لجن قهوه‌ای تیره بود. درکل، شاخص حجمی لجن به اندازه ۵۰ تا ۱۵۰ میلی لیتر در گرم، به لحاظ ته‌نشینی شرایط قابل قبول تلقی می‌شود [۲۲].



شکل ۱. راکتور ناپیوسته متوالی:

۱. پمپ هوادهی، ۲. فلومتر، ۳. ترمینال هوادهی، ۴. همزن، ۵. اکسیژن محلول سنج و نمایش دما، ۶. هیتر الکتریکی، ۷. شیر تخلیه پساب، ۸. شیر تخلیه لجن، ۹. سنگهای دیفیوزر (با توجه به طراحی آزمایش، سنگ مربوطه از طریق ترمینال هوادهی فعال می‌شد).

### ۳.۲. طراحی آزمایش

در دنیای مهندسی، طرح آزمایش ابزاری بسیار مهم برای

استفاده از پمپ هوای آکواریوم و سنگ دیفیوزر واقع در کف (هوادهی عمقی، ۰ سانتی‌متر)، وسط (۱۵ سانتی‌متر) و سطح فاضلاب راکتورها (هوادهی سطحی، ۳۰ سانتی‌متر) و مطابق با طراحی آزمایش به کمک ترمینال هوادهی تنظیم و تأمین می‌شد. سرعت هوادهی ۳ لیتر در دقیقه و غلظت اکسیژن محلول بیشتر از میلی‌گرم در لیتر ۲ بود. مخزن آماده‌سازی فاضلاب و راکتورها به هیتر الکتریکی (راکسین- اچ تی ۱۹۰۰)<sup>۱</sup> مجهز بودند. زمان لازم برای تنظیم دمای فاضلاب در مخزن آماده‌سازی فاضلاب حدود ۶۰-۸۰ دقیقه بود و انتقال فاضلاب از مخزن آماده‌سازی فاضلاب به راکتورها به صورت دستی انجام می‌گرفت. در مرحله واکنش و پرکردن، برای اختلاط محتویات راکتورها از همزنی با سرعت چرخش ۵۰ دور در دقیقه استفاده شد. پی اچ<sup>۲</sup> فاضلاب ورودی به راکتورها در محدوده ۷-۷/۳ قرار داشت. راکتورها در چرخه‌های ۲۴ ساعته بهره‌برداری می‌شدند که شامل ۱۰ دقیقه پرکردن، ۲۲ ساعت واکنش، ۳۰ دقیقه ته‌نشینی و ۸۰ دقیقه تخلیه و سکون بود. حجم کاری راکتورها ۱۲ لیتر و حجم فاضلاب ورودی و تخلیه شده، برابر و به میزان ۸ لیتر بود. تخلیه فاضلاب از طریق شیر پلاستیکی واقع در جداره راکتورها انجام می‌گرفت. زمان ماند سلولی در دوره آزمایش‌های طراحی‌شده، از طریق حذف مستقیم لجن از راکتورها (حجم مایع مخلوط راکتور در هر روز) در ۲۰ روز کنترل شد؛ به عبارت دیگر، میزان دفع لجن یکسان بود، ولی در هر دفع، غلظت مایع مخلوط داخل راکتور کمی متفاوت بود. زمان ماند هیدرولیکی ۱/۵ روز بود.

### ۲.۲. فاضلاب سنتزی و لجن زیستی

پس از تهیه کود گاوی و شست‌وشوی آن با آب، جامدات معلق موجود در آن - که ممکن است در آنالیزها و روند رشد باکتری‌ها تداخل ایجاد کند- به کمک الک آزمایشگاهی جدا شد و شیرابه به دست آمده به عنوان بذر لجن به راکتورها منتقل شد. از کلرید آمونیوم و نشاسته به ترتیب به عنوان منابع نیتروژنی و آلی استفاده شد. در دوره تطابق‌پذیری، لجن زیستی در SBR<sub>p</sub> به سی او دی ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و در SBR<sub>p</sub> به سی او دی ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر تطابق یافت تا تفاوت در میزان سازگاری لجن در برابر سرعت‌های مختلف بارگذاری آلی و سایر پارامترهای ورودی بررسی شود.  $NH_4^+ - N$ ، ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، فسفات هیدروژن پتاسیم ۳۰ میلی‌گرم در لیتر، سولفات منیزیم هفت آب ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، کلرید کلسیم دو آب ۳۵۰ میلی‌گرم در لیتر، سولفات آهن ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و ۱

1. Roxin-HT1900
2. pH
3. Mixed liquor suspended solids
4. Mixed liquor volatile suspended solids

مرکزی وجود دارند. نقاط محوری طبق رابطه  $\alpha = (2^k)^{1/25}$  تعیین می‌شود (k تعداد متغیر عددی است). همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، عمق هوادهی (کف راکتور: هوادهی رو به بالا، میانه راکتور: هوادهی رو به بالا، سطح فاضلاب راکتور: هوادهی رو به پایین)، دما (۱۸، ۲۵ °C و ۳۲) و سرعت بارگذاری ماده محلول (او ال آر) (۲۶۷، ۹۳۳ و ۱۶۰۰ (مترمکعب، روز/گرم)) متغیرهای مستقل و تأثیرگذار بر راکتورهای ناپیوسته متوالی با میزان سازگاری متفاوت لجن انتخاب شدند و میزان حذف سی او دی به‌عنوان پاسخ فرایند، سنجش شد. شایان ذکر است سطوح متغیرهای مستقل با انجام دادن چند آزمایش ابتدایی، قبل از طراحی آزمایش مشخص شدند، به‌طوری‌که عملکرد راکتور بازده معینداری داشته باشد.

اصلاح عملکرد فرایندهای تولید است. همچنین، کاربردی وسیع در بسط فرایندهای جدید دارد. روش سطح پاسخ یکی از روش‌های طراحی آزمایش است که مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آمار را دربرمی‌گیرد. این روش برای مدل‌بندی و تحلیل مسائلی مفید است که پاسخ مورد نظر از چندین متغیر تأثیر می‌پذیرد [۹]. از این روش در بهینه‌سازی پارامترهای تأثیرگذار بر تصفیه نیمه‌هوازی شیرابه محل دفن زباله [۲۳]، حذف سولفات [۲۴] و کاهش سی او دی فاضلاب تنباکو [۲۵] نیز استفاده شده است.

در این تحقیق، از طراحی مرکب مرکزی (سی سی دی) و روش سطح پاسخ از طریق نرم‌افزار دیزای اکسپرت ۷ استفاده شد. در این روش، سه گروه از نقاط  $(2^k + 2k + C)$  شامل تعداد  $2^k$  نقاط فاکتوریل،  $2k$  نقاط محوری و تعداد C نقطه

جدول ۱. متغیرهای مستقل آزمایش به روش سطح پاسخ

| متغیرهای مستقل    | واحد                   | کد | سطح پایین        | سطح متوسط                           | سطح بالا           |
|-------------------|------------------------|----|------------------|-------------------------------------|--------------------|
| دما               | □                      | A  | ۱۸               | ۲۵                                  | ۳۲                 |
| OLR               | g/(m <sup>3</sup> . d) | B  | ۲۶۷              | ۹۳۳                                 | ۱۶۰۰               |
| عمق هوادهی        | cm                     | C  | کف راکتور (0 cm) | میانه (15 cm)                       | سطح فاضلاب (30 cm) |
| میزان سازگاری لجن | -                      | D  |                  | SBR <sub>1</sub> ، SBR <sub>2</sub> |                    |

#### ۴.۲. روش اندازه‌گیری

تمام آزمایش‌ها طبق روش استاندارد آب و فاضلاب اندازه‌گیری شدند [۲۷]. با استفاده از روش رفلکس بسته و کلریمتریک شماره ۵۲۲۰ دی مقدار سی او دی اندازه‌گیری شد. از پی اچ متر (Behine SAT2002) برای اندازه‌گیری پی اچ و از سنسور اندازه‌گیری اکسیژن محلول (AZ-8403) برای اندازه‌گیری غلظت اکسیژن محلول و دما استفاده شد. حجمی (میلی‌لیتر) که یک گرم سوسپانسیون پس از سی دقیقه ته‌نشینی اشغال می‌کند، شاخص حجمی لجن نامیده می‌شود. اس وی آی توانایی ته‌نشینی لجن را نشان می‌دهد [۲۷]. زمان ماند هیدرولیکی از تقسیم حجم کاری راکتور بر میزان فاضلاب ورودی (که با پساب خروجی برابر است) به‌دست می‌آید و سرعت بارگذاری ماده آلی از تقسیم میزان سی او دی ورودی بر زمان ماند هیدرولیکی تعیین می‌شود.

در بیشتر مسائل مربوط به روش سطح پاسخ، وابستگی بین پاسخ و متغیرهای مستقل نامعلوم است. با توجه به ناشناخته بودن تابعیت پاسخ از متغیرهای مستقل، باید شکل آن تخمین زده شود. درحقیقت، کاربرد موفقیت‌آمیز روش سطح پاسخ به‌صورت بحرانی به قابلیت توسعه مناسب برای این تابعیت بستگی دارد. اگر پاسخ به‌خوبی از طریق یک تابع خطی از متغیرهای مستقل مدل‌بندی شده باشد، تابع تقریب‌کننده، مدل مرتبه اول است. اگر خمیدگی وجود داشته باشد، باید از چندجمله‌ای‌های مرتبه بالاتر مانند مدل مرتبه دوم استفاده کرد. کیفیت تطابق مدل‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار را با ضریب تعیین  $R^2$  بیان می‌کنند و بخش‌های مختلف مدل از طریق مقدار احتمال (عدد پی)  $^2$  با ۹۵ درصد سطح اطمینان قابل‌ارزیابی است [۲۶]. برای تفسیر کامل نتایج می‌توان از جدول آنالیز واریانس (آنوا) بهره برد. نمودارهای کانتور و سه‌بعدی برای نمایش محدوده مناسب عملیاتی و اثر هر متغیر و برهم‌کنش بین متغیرها بسیار مفید است.

1. Organic Loading Rate (OLR)

2. P-value

3. 5220D

### ۵.۲. روش انجام دادن آزمایش

ساعت هوادهی (C)، پمپ هوادهی خاموش می‌شد و پس از ۳۰ دقیقه تهنشینی، هشت لیتر پساب از راکتور خارج و میزان سی او دی اندازه‌گیری می‌شد (A, B, C و D همان متغیرهای ورودی هستند). مدت زمان هر چرخه اس بی آر برای انجام دادن هر یک از آزمایش‌ها یکسان و ۲۴ ساعت بود و با بررسی شاخص حجمی لجن و میزان سی او دی، این مدت زمان برای رسیدن به حالت پایدار مناسب ارزیابی شد. میزان شاخص حجمی لجن در دوره آزمایش‌ها متغیر و کمتر از ۱۶۰ میلی‌لیتر در گرم بود.

پس از دوره تطابق‌پذیری، برای انجام دادن آزمایش‌ها چهار لیتر لجن در  $SBR_1$  و  $SBR_2$  نگه داشته شد. شایان ذکر است لجن دو راکتور با سی او دی متفاوتی دوره سازگاری را گذراندند. با توجه به تعداد متغیرهای ورودی و سطوح آن‌ها، آزمایش‌ها از طریق نرم‌افزار دیزاین اکسپرت طراحی شدند. ترتیب آزمایش‌ها (جدول ۲، آزمایش‌های ۱ تا ۴۰) کاملاً تصادفی بوده است. هشت لیتر فاضلاب سنتزی مطابق با شرایط هر آزمایش تهیه می‌شد؛ یعنی براساس میزان بارگذاری آلی (B) آزمایش مربوطه، سی او دی ورودی (نشاسته) به سایر ترکیبات فاضلاب سنتزی افزوده می‌شد. سپس در مخزن نگهداری فاضلاب، دمای آزمایش (A) تنظیم می‌شد. طی ده دقیقه فاضلاب سنتزی از مخزن نگهداری فاضلاب به راکتور (D) انتقال می‌یافت. بعد از ۲۲

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. نتایج آزمایش‌ها و بررسی صحت مدل برازش‌شده

نتایج کل آزمایش‌ها به همراه سطوح متغیرهای مستقل هر آزمایش در جدول ۲ آورده می‌شود.

جدول ۲. نتایج طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ

| ترتیب آزمایش | متغیرهای مستقل فرایند |      |    |         | پاسخ فرایند (درصد حذف سی او دی) |              |
|--------------|-----------------------|------|----|---------|---------------------------------|--------------|
|              | A                     | B    | C  | D       | مقدار حاصل از آزمایش            | پیش‌بینی مدل |
| ۱            | ۱۸                    | ۲۶۶  | ۰  | $SBR_1$ | ۸۲                              | ۷۹/۸۹        |
| ۲            | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۱۵ | $SBR_1$ | ۷۹/۷                            | ۷۷/۴۵        |
| ۳            | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۱۵ | $SBR_1$ | ۸۲                              | ۷۹/۹۶        |
| ۴            | ۱۸                    | ۱۶۰۰ | ۳۰ | $SBR_1$ | ۴۱/۸                            | ۴۲/۴۹        |
| ۵            | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۱۵ | $SBR_1$ | ۸۴/۸                            | ۷۹/۹۶        |
| ۶            | ۳۲                    | ۲۶۶  | ۳۰ | $SBR_1$ | ۸۵                              | ۸۶/۴۶        |
| ۷            | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۱۵ | $SBR_2$ | ۹۲/۸                            | ۹۲/۰۱        |
| ۸            | ۳۲                    | ۱۶۰۰ | ۰  | $SBR_2$ | ۸۹                              | ۸۳/۸۴        |
| ۹            | ۳۲                    | ۱۶۰۰ | ۳۰ | $SBR_2$ | ۶۳/۱                            | ۶۶/۲۰        |
| ۱۰           | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۱۵ | $SBR_2$ | ۸۸/۸                            | ۹۲/۰۱        |
| ۱۱           | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۳۰ | $SBR_2$ | ۸۹/۹                            | ۸۷/۶۱        |
| ۱۲           | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۱۵ | $SBR_2$ | ۹۴                              | ۹۲/۰۷        |
| ۱۳           | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۰  | $SBR_1$ | ۸۱/۷                            | ۸۶/۹۹        |
| ۱۴           | ۱۸                    | ۱۶۰۰ | ۳۰ | $SBR_2$ | ۶۰/۸                            | ۶۱/۲۹        |
| ۱۵           | ۲۵                    | ۲۶۶  | ۱۵ | $SBR_1$ | ۹۳                              | ۹۰/۵۱        |
| ۱۶           | ۲۵                    | ۱۶۰۰ | ۱۵ | $SBR_1$ | ۶۱/۸                            | ۶۳/۳۵        |
| ۱۷           | ۱۸                    | ۲۶۶  | ۳۰ | $SBR_1$ | ۷۰                              | ۷۴/۷۰        |
| ۱۸           | ۱۸                    | ۱۶۰۰ | ۰  | $SBR_2$ | ۷۹/۱                            | ۸۰/۰۹        |
| ۱۹           | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۱۵ | $SBR_1$ | ۷۹/۷                            | ۷۹/۹۶        |
| ۲۰           | ۳۲                    | ۲۶۶  | ۳۰ | $SBR_2$ | ۹۳                              | ۹۱/۷۵        |
| ۲۱           | ۳۲                    | ۲۶۶  | ۰  | $SBR_1$ | ۹۲                              | ۹۰/۵۱        |
| ۲۲           | ۳۲                    | ۱۶۰۰ | ۳۰ | $SBR_1$ | ۵۱/۸                            | ۵۰/۷۵        |
| ۲۳           | ۱۸                    | ۲۶۶  | ۰  | $SBR_2$ | ۸۹                              | ۸۸/۵۴        |
| ۲۴           | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۱۵ | $SBR_2$ | ۸۵/۹                            | ۹۲/۰۱        |
| ۲۵           | ۲۵                    | ۱۶۰۰ | ۱۵ | $SBR_2$ | ۸۰                              | ۷۹/۹۷        |
| ۲۶           | ۳۲                    | ۹۳۳  | ۱۵ | $SBR_1$ | ۷۱/۱                            | ۷۵/۷۵        |
| ۲۷           | ۲۵                    | ۲۶۶  | ۱۵ | $SBR_2$ | ۹۵                              | ۹۷/۴۷        |
| ۲۸           | ۱۸                    | ۹۳۳  | ۱۵ | $SBR_1$ | ۶۳/۷                            | ۶۶/۳۱        |

ادامه جدول ۲. نتایج طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ

| ترتیب آزمایش | متغیرهای مستقل فرایند |      |    |                  | پاسخ فرایند (درصد حذف سی او دی) |              |
|--------------|-----------------------|------|----|------------------|---------------------------------|--------------|
|              | A                     | B    | C  | D                | مقدار حاصل از آزمایش            | پیش بینی مدل |
| ۲۹           | ۳۲                    | ۱۶۰۰ | ۰  | SBR <sub>1</sub> | ۶۷/۸                            | ۶۸/۴۰        |
| ۳۰           | ۱۸                    | ۹۳۳  | ۱۵ | SBR <sub>2</sub> | ۸۴/۶                            | ۸۰/۰۳        |
| ۳۱           | ۱۸                    | ۲۶۶  | ۳۰ | SBR <sub>2</sub> | ۸۴                              | ۸۳/۳۴        |
| ۳۲           | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۱۵ | SBR <sub>1</sub> | ۷۹/۴                            | ۷۹/۹۶        |
| ۳۳           | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۱۵ | SBR <sub>1</sub> | ۸۱/۷                            | ۷۹/۹۷        |
| ۳۴           | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۱۵ | SBR <sub>2</sub> | ۹۴                              | ۹۲/۰۱        |
| ۳۵           | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۱۵ | SBR <sub>2</sub> | ۹۳/۱                            | ۹۲/۰۱        |
| ۳۶           | ۱۸                    | ۱۶۰۰ | ۰  | SBR <sub>1</sub> | ۶۳                              | ۶۱/۲۸        |
| ۳۷           | ۳۲                    | ۲۶۶  | ۰  | SBR <sub>2</sub> | ۹۶                              | ۹۵/۷۹        |
| ۳۸           | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۰  | SBR <sub>2</sub> | ۹۴/۸                            | ۹۹/۰۳        |
| ۳۹           | ۲۵                    | ۹۳۳  | ۳۰ | SBR <sub>1</sub> | ۸۰/۸                            | ۷۵/۵۷        |
| ۴۰           | ۳۲                    | ۹۳۳  | ۱۵ | SBR <sub>2</sub> | ۸۶/۸                            | ۸۶/۱۱        |

جدول ۳. نتایج آنالیز واریانس (آنوا) برای میزان حذف سی او دی (درصد)

| Source         | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | Comment |
|----------------|----------------|----|-------------|---------|---------|---------|
| Model          | ۶۲۲۷/۱۵        | ۱۳ | ۴۷۹/۰۱      | ۴۰/۵۷   | <۰/۰۰۰۱ | مهم     |
| A              | ۳۰۱/۰۹         | ۱  | ۳۰۱/۰۹      | ۲۵/۵۰   | <۰/۰۰۰۱ |         |
| B              | ۲۴۳۷/۶۳        | ۱  | ۲۴۳۷/۶۳     | ۲۰۶/۴۷  | <۰/۰۰۰۱ |         |
| C              | ۶۵۲/۰۸         | ۱  | ۶۵۲/۰۸      | ۵۵/۲۳   | <۰/۰۰۰۱ |         |
| D              | ۱۴۵۰/۸۲        | ۱  | ۱۴۵۰/۸۲     | ۱۲۲/۸۸  | <۰/۰۰۰۱ |         |
| AB             | ۱۲/۲۵          | ۱  | ۱۲/۲۵       | ۱/۰۴    | ۰/۳۱۷۸  |         |
| AC             | ۱/۳۲           | ۱  | ۱/۳۲        | ۰/۱۱    | ۰/۷۴۰۵  |         |
| AD             | ۱۴/۱۱          | ۱  | ۱۴/۱۱       | ۱/۲۰    | ۰/۲۸۴۳  |         |
| BC             | ۱۸۴/۹۶         | ۱  | ۱۸۴/۹۶      | ۱۵/۶۷   | ۰/۰۰۰۵  |         |
| BD             | ۱۲۹/۰۳         | ۱  | ۱۲۹/۰۳      | ۱۰/۹۳   | ۰/۰۰۲۸  |         |
| CD             | ۰/۰۰           | ۱  | ۰/۰۰        | ۰/۰۰    | ۱       |         |
| A <sup>2</sup> | ۴۳۹/۰۰         | ۱  | ۴۳۹/۰۰      | ۳۷/۱۸   | <۰/۰۰۰۱ |         |
| B <sup>2</sup> | ۵۰/۶۳          | ۱  | ۵۰/۶۳       | ۴/۲۹    | ۰/۰۴۸۴  |         |
| C <sup>2</sup> | ۹/۵۲           | ۱  | ۹/۵۲        | ۰/۸۱    | ۰/۳۷۷۳  |         |
| Residual       | ۳۰۶/۹۷         | ۲۶ | ۱۱/۸۱       | -       | -       |         |
| Lack of Fit    | ۲۳۰/۰۱         | ۱۶ | ۱۴/۳۸       | ۱/۸۷    | ۰/۱۵۹۱  | غیرمهم  |
| Pure Error     | ۷۶/۹۶          | ۱۰ | ۷/۷۰        | -       | -       |         |
| Cor Total      | ۶۵۳۴/۱۱        | ۳۹ | -           | -       | -       |         |

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شد، عدد اف<sup>۲</sup> مدل ۴۰/۵۷ است و دارای عدد پی کمتر از ۰/۰۰۰۱ است. همچنین، مشاهده شد مدل مدنظر برای حذف سی او دی مهم و شایان توجه است و فقط ۰/۰۱ درصد احتمال دارد که این مقدار عدد اف به دلیل اختلال یا نویز باشد. مقادیر عدد

با استفاده از روش سطح پاسخ می‌توان ارتباط بین چهار متغیر مستقل و پاسخ فرایند یعنی میزان حذف سی او دی را تجزیه و تحلیل کرد. جدول ۳، آنالیز واریانس (آنوا)<sup>۱</sup> پارامترهای مورد بررسی مدل سطح پاسخ پیش‌بینی شده را برای میزان حذف سی او دی نشان می‌دهد.

1. ANOVA  
2. F-value

ضریب واریانس<sup>۴</sup> نسبت خطای استاندارد تخمینی به مقدار متوسط پاسخ مشاهده شده تعریف می‌شود. مدل‌های با ضریب واریانس بزرگ‌تر از ۱۰ درصد تجدیدپذیر<sup>۵</sup> در نظر گرفته می‌شوند [۲۶]. ضریب واریانس مدل تحقیق (C.V.%=۴/۲۶) کمتر از ۱۰ درصد بود. دقت کافی<sup>۶</sup>، محدوده مقادیر پیش‌بینی شده را در نقاط طراحی نسبت به متوسط خطای پیش‌بینی شده مقایسه می‌کند. اگر این نسبت از ۴ بزرگ‌تر باشد، مطلوب توصیف می‌شود. در این مطالعه، تناسب دقت ۲۷/۸۱۷ است و تأیید می‌کند که مدل برای توصیف فضای طراحی قابل استفاده است. مدل نهایی به دست آمده از میزان حذف سی او دی در جدول ۴ آورده می‌شود. A، B، C و D ترم‌های مدل هستند که همان متغیرهای عملیاتی سامانه را ارائه می‌دهند. مدل ارائه شده فقط در محدوده سطوح متغیرهای مستقل این تحقیق صحت دارد.

پی کوچک‌تر از ۰/۰۵ ترم‌های مهم مدل را نشان می‌دهند، درحالی‌که مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۱ بیانگر بی‌اهمیت بودن ترم‌های مدل است [۲۸]. نبود برازش<sup>۱</sup> مشخصه نامطلوب مدل است و تغییرات داده‌ها را در زمینه مدل برازش شده شرح می‌دهد. اگر مدل داده‌ها را به خوبی برازش نکند، نبود برازش ترم مهمی می‌شود. مقدار عدد پی نبود برازش تحقیق، بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است که نشانگر ارتباط خوب بین متغیرها و پاسخ است. هرچه مقادیر ضریب همبستگی<sup>۲</sup> یا تعیین به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر اصلاح یا تعدیل<sup>۳</sup> قابل قبول مدل با داده‌های آزمایش است. اختلاف مقادیر به دست آمده از عدد یک به معنی این است که به همان میزان نبود تجانس وجود دارد و از طریق مدل تجربی تشریح نمی‌شود. مقدار ضریب همبستگی تحقیق ( $R^2 = 0/9530$ ) بیشتر از ۰/۸ بود که تطابق خوب بین نتایج محاسبه شده و پیش‌بینی شده را در محدوده آزمایش بیان می‌کند. ضریب همبستگی یک مدل مناسب حداقل ۰/۸ است [۲۹].

جدول ۴. مدل نهایی پاسخ فرایند

| نوع مدل               | معادله نهایی   |
|-----------------------|--|
| برحسب فاکتورهای گذشته | $85.99 + 3.88A - 11.04B - 5.71C + 6.02D - 0.88AB + 0.29AC - 0.84AD - 3.40BC + 2.54BD + 0.0CD - 8.93A^2 - 3.03B^2 + 1.32C^2$  |
| SBR <sub>1</sub> :    | $- 38.86165 + 9.92448 * Tem. + 2.14869E - 003 * OLR - 0.30751 * depth - 1.87406E - 004 * Tem. * OLR + 2.73810E - 003 * Tem. * depth - 3.39830E - 004 * OLR * depth - 0.18233 * Tem.^2 - 6.81988E - 006 * OLR^2 + 5.84848E - 003 * depth^2$ |
| برحسب فاکتورهای واقعی | SBR <sub>2</sub> :   |
|                       | $- 27.92255 + 9.68448 * Tem. + 9.76488E - 003 * OLR - 0.30751 * depth - 1.87406E - 004 * Tem. * OLR + 2.73810E - 003 * Tem. * depth - 3.39830E - 004 * OLR * depth - 0.18233 * Tem.^2 - 6.81988E - 006 * OLR^2 + 5.84848E - 003 * depth^2$ |

شکل ۲- ب نمودار مقادیر پیش‌بینی شده برحسب مقادیر واقعی را برای پاسخ نشان می‌دهد. می‌توان به کمک این نمودار مقدار یا گروهی از مقادیر را تشخیص داد که به راحتی از طریق مدل پیش‌بینی نمی‌شوند، زیرا داده‌ها باید حول خط ۴۵ درجه باشند. پراکندگی منظم داده‌های حاصل از آزمایش بیانگر معتبر بودن مدل انتخابی و قابلیت آن در پیش‌بینی نقاط آزمایش است.

### ۲.۲. نمودارهای خطایاب

مهم است بدانیم مدل انتخابی تقریب کافی را برای یک مجموعه واقعی فراهم می‌کند یا خیر. بدین منظور، می‌توان از نمودارهای خطایاب استفاده کرد. در شکل ۲- الف میزان احتمال نرمال برحسب باقیمانده نشان داده می‌شود. این نمودار نشانگر تبعیت داشتن یا تبعیت نداشتن مقادیر باقیمانده از یک توزیع نرمال است. در توزیع نرمال، نقاط در امتداد یک خط راست قرار می‌گیرند. شکل ۲- الف دارای توزیع نرمال است و نتایج و مدل ارائه شده را قابل اعتماد ارزیابی می‌کند.

1. Lack of fit (LOF)

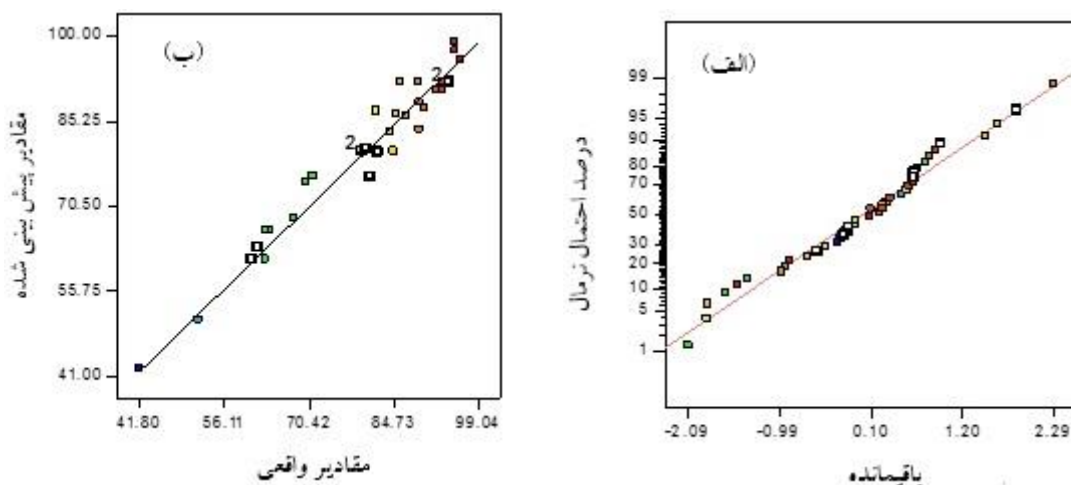
4. Coefficient of variance (CV)

2. Correlation

5. Reproducibility

3. Modification

6. Adequate Precision (AP)



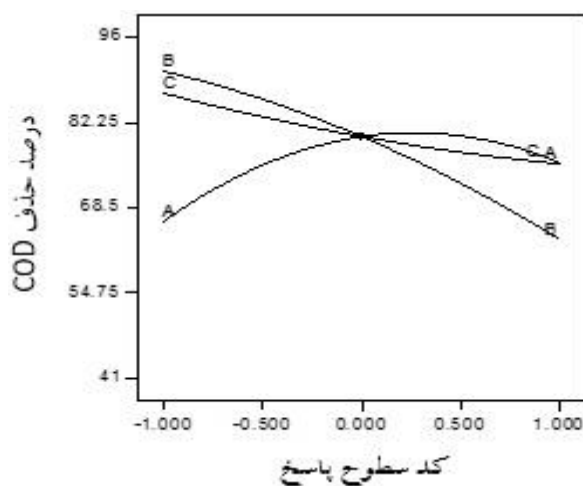
شکل ۲. الف: نمودار میزان احتمال نرمال بر حسب باقیمانده (درصد)، ب: نمودار مقادیر پیش‌بینی شده بر حسب مقادیر واقعی

تغییر یک متغیر رسم شده است، در صورتی که سایر متغیرها ثابتند. برای پیش‌فرض نرم‌افزار، نقطه میانی تمام متغیرهای عددی ثابت است (پیش‌فرض نرم‌افزار را می‌توان تغییر داد). در نمودار آشفتگی، شیب یا انحنای زیاد یک متغیر نشانگر حساسیت زیاد پاسخ نسبت به آن متغیر است. محور X نمودار آشفتگی، کد سطوح پاسخ (۱- تا +۱) است. با توجه به جدول ۳، درجه اهمیت و تأثیرگذاری ترم‌های مهم مدل به صورت  $B > D > C > A^2 > A > BC > BD > B^2$  هستند.

### ۳.۳. عملکرد راکتور

#### ۱.۳.۳. نگاهی کلی به روند تغییر متغیرها

نمودارهای سه‌بعدی و کانتوری که از طریق نرم‌افزار دیزاین اکسپرت ۷ به دست آمدند، برای بررسی ارتباط بین متغیرهای مستقل و پاسخ به کار می‌رود. در نمودارهای سه‌بعدی، یک متغیر از طریق نرم‌افزار ثابت نگه داشته می‌شود، در حالی که دو متغیر دیگر در محدوده آزمایش تغییر می‌کنند. در شکل ۳، نمودار آشفتگی<sup>۱</sup> آورده می‌شود. این نمودار مقایسه‌ای از آثار نسبی تمام متغیرهای مستقل را در یک نقطه خاص از محدوده طراحی بر راندمان حذف سی او دی نشان می‌دهد. پاسخ فقط بر اساس



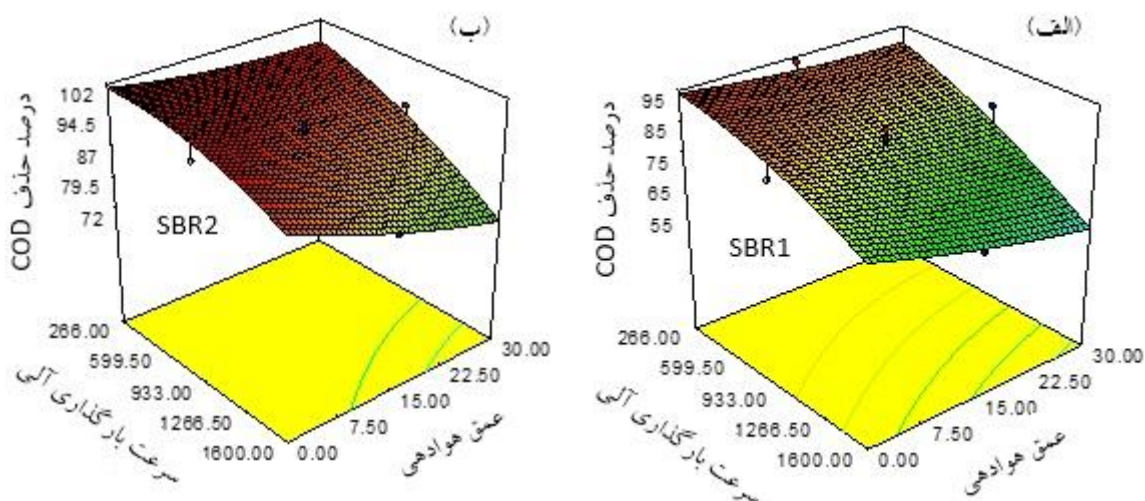
شکل ۳. نمودار آشفتگی - روند تغییر متغیرها



باشند. سانتود و سوریاکیت اثر سرعت بارگذاری آلی را بر حذف مواد آلی با به‌کارگیری فیلم زیستی در اس بی آر هوازی بررسی کردند. تحقیقات نشان داد کاهش سرعت بارگذاری آلی موجب افزایش سرعت حذف مواد آلی می‌شود [۳۰]. کرگی و اوپگور، استفاده از اس بی آر پنج مرحله‌ای را به‌منظور بررسی تأثیر سرعت‌های بارگذاری با استفاده از گلوکز و سدیم استات به‌عنوان منابع کربن بررسی کردند. یافته‌ها بیانگر آن است که با افزایش سرعت‌های بارگذاری مواد مغذی، میزان حذف سی او دی، نیتروژن و فسفر کاهش می‌یابد [۳۱]. راجاسیمان و کارتیکیان، به کمک زیست توده<sup>۱</sup> چگالی کم واحد تصفیه نشاسته توانستند ۹۳/۸ درصد سی او دی را طی زمان ماند هیدرولیکی ۲۴ ساعت در یک راکتور زیستی بستر سیالی حذف کنند. همچنین، آن‌ها دریافتند افزایش زمان ماند هیدرولیکی و کاهش سی او دی ورودی به افزایش حذف سی او دی منجر می‌شود [۳۲]. در این تحقیق، بیشترین راندمان حذف سی او دی (نشاسته) ۹۶ درصد بود که در سرعت بارگذاری کم و هوادهی عمقی در SBR<sub>۲</sub> به‌دست آمد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد راکتور ناپیوسته متوالی به کمک زیست توده کود گاوی، در شرایط عملیاتی مناسب، فاضلاب صنعت نشاسته را مطابق با استانداردهای خروجی پساب تصفیه می‌کند.

### ۲.۳.۳. تأثیر اول آر و تفاوت در سازگاری لجن بر میزان حذف سی او دی

شکل ۴ تغییرات میزان حذف سی او دی را به‌صورت تابعی از عمق هوادهی و سرعت بارگذاری آلی در دو راکتور SBR<sub>۱</sub> و SBR<sub>۲</sub> در قالب نمودار سه‌بعدی نشان می‌دهد. پارامتر سوم یعنی دما که در شکل ۴ مشاهده نمی‌شود، از طریق نرم‌افزار در مقدار بهینه تنظیم شده است. مقدار بهینه برای پارامترهای عملیاتی به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که راندمان حذف سی او دی بیشترین مقدار ممکن شود. متوسط راندمان حذف برای چهل آزمایش انجام‌گرفته ۷۹/۶۰ درصد بود. همان‌طور که در شکل ۴ (الف و ب) مشخص است، با افزایش سرعت بارگذاری آلی، راندمان حذف سی او دی در هر دو راکتور کاهش یافت. متوسط راندمان حذف راکتور SBR<sub>۲</sub> حدود ۱۲ درصد بیشتر از SBR<sub>۱</sub> بود و در مقادیر بالای بارگذاری آلی، راکتور SBR<sub>۱</sub> بیشتر تحت تأثیر بود. در سرعت بارگذاری پایین، راندمان هر دو راکتور بالا بود و هیچ ممانعت شایان توجهی در فعالیت میکروارگانیسم‌ها مشاهده نشد. این نتایج نشان می‌دهد سازگاری لجن به مقادیر بالای مواد آلی، مقاومت در برابر بازدارندگی و مهار فعالیت میکروارگانیسم‌ها را فراهم می‌کند و این امر سبب شده است تا در سرعت بارگذاری ۱۶۰۰ (گرم در مترمکعب در روز)، میکروارگانیسم‌های راکتور SBR<sub>۲</sub> عملکرد بهتری داشته

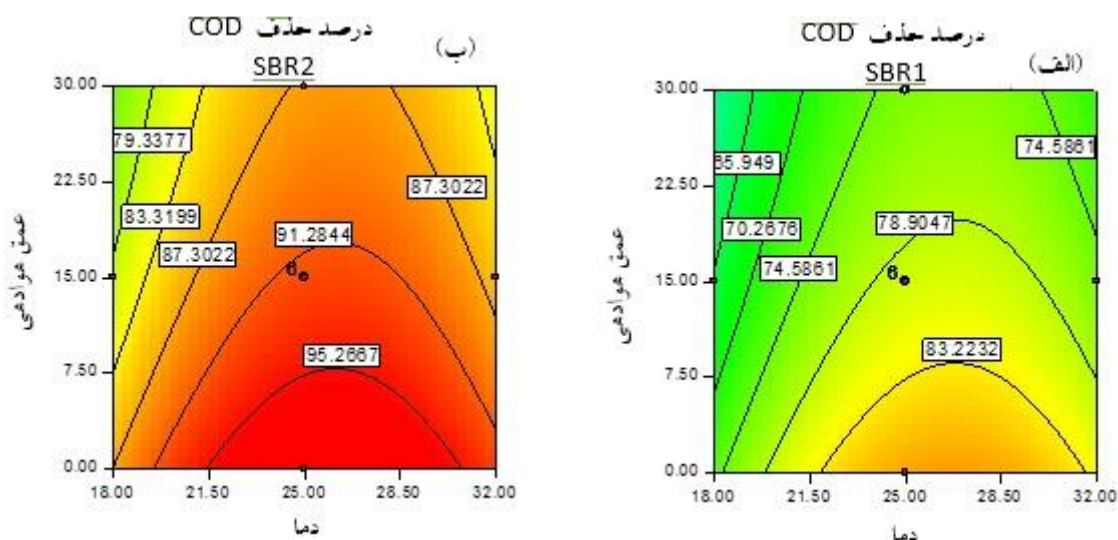


شکل ۴. نمودار طراحی آزمایش - نمودار سه بعدی: اثر متغیرهای سرعت بارگذاری آلی و عمق هوادهی بر میزان حذف سی او دی در دو راکتور

با دما، پارامتر  $A^2$  مهم شده است. در دمای ۱۸ درجه سانتی‌گراد، سرعت ته‌نشینی توده‌های لجن اندکی کاهش یافته بود و رنگ پساب تصفیه‌شده کدر بود. به‌نظر می‌رسد دمای پایین بر دانسیته و اس وی ای تأثیر می‌گذارد. دمای پایین نه‌تنها بر فعالیت باکتری‌ها تأثیر می‌گذارد؛ بلکه بر جمعیت میکروبی گونه‌ها مؤثر است [۳۴]. برای اقدام متقابل در تصفیه فاضلاب دمای پایین، می‌توان تجزیه بیولوژیکی را با طولانی‌کردن زمان ماند هیدرولیکی یا زمان هوادهی به‌طور چشمگیری افزایش داد [۳۵]. در این تحقیق، هرچند بیشترین بازده سیستم در دمای ۳۲ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد (آزمایش ۳۷)، ولی با توجه به کل آزمایش‌ها و نتایج آن، محدوده دمایی ۲۵ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد بیشترین راندمان حذف سی او دی را در پی داشت (به شکل ۵ توجه شود). یانپینگ و همکاران، در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به بیشترین راندمان حذف سی او دی (۹۶ درصد) از فاضلاب کشتارگاه با استفاده از اس بی آر دست یافتند [۳۶]. وجود نقطه اوج<sup>۱</sup> در تغییر راندمان سی او دی با دما نشان می‌دهد برای دستیابی به بیشترین راندمان باید در محدوده طراحی آزمایش، بهینه‌سازی انجام گیرد. براساس نتایج، دما پارامتری مهم برای دستیابی به بازده کلی فرایندهای تصفیه بیولوژیکی است.

۳.۳.۳. تأثیر عمق هوادهی و دما بر میزان حذف سی او دی در هوادهی عمقی، بازده راکتورها در مقایسه با دو حالت هوادهی میانی و سطحی بیشتر بود. کمترین بازده راکتورهای  $SBR_1$  و  $SBR_2$  به ترتیب ۴۱/۸ درصد و ۶۸/۸ درصد بود که در شرایط درجه سانتی‌گراد  $A=18$ ، (گرم در مترمکعب در روز)  $B=1600$  و سانتی‌متر  $C=30$  به‌دست آمدند. به‌نظر می‌رسد در هوادهی سطحی و در سرعت‌های بالای بارگذاری آلی، مقدار دبی هوای ورودی باید افزایش یابد تا جوابگوی فعالیت میکروارگانیسم‌های هوازی موجود در کف راکتور باشد. در تحقیق هو و همکاران، تأثیر افزایش دبی هوای ورودی بر بهبود راندمان حذف سی او دی مشاهده شد [۱۸]. همچنین، احتمال دارد در هوادهی میانی و سطحی، در ناحیه نزدیک به کف راکتور که اکسیژن کمتری موجود است، باکتری‌های بی‌هوازی فعال باشند که در تجزیه هوازی ماده آلی چندان دخالتی ندارند. غلظت پایین اکسیژن محلول موجب کاهش حذف سی او دی و اکسیداسیون  $NH_4^+ - N$  می‌شود [۳۳].

با افزایش دما از ۱۸ C به ۲۵ C، متوسط راندمان حذف سی او دی از ۷۱/۸ درصد به ۸۵/۶ درصد افزایش یافت. با افزایش ثانویه دما به ۳۲ درجه سانتی‌گراد، عملکرد راکتورها به‌ویژه  $SBR_1$  که به مقدار سی او دی کمتری تطابق یافته بود، کاهش یافت. به‌دلیل انحنای روند تغییرات سی او دی



شکل ۵. نمودار طراحی آزمایش - نمودار کانطور: اثر متغیرهای دما و عمق هوادهی بر میزان حذف سی او دی در دو راکتور

#### ۴.۳. بهینه‌سازی فرایند

عمق هوادهی، سرعت بارگذاری آلی و لجن سازگاریافته به بار آلی متفاوت بر میزان حذف سی او دی (نشاسته) در دو راکتور ناپیوسته متوالی بررسی شد. آزمایش‌ها به کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و با روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی طراحی شدند. بهینه‌سازی حذف سی او دی در محدوده عملیاتی متغیرهای مستقل و براساس ماکزیمم میزان حذف تعریف شد. براساس نتایج، اس بی آر با کود گاوی منبع لجن یک راکتور موفق در حذف مواد آلی است. بیشترین راندمان حذف سی او دی در راکتور SBR<sub>p</sub> که به ماده آلی بیشتری سازگاری یافته بود، به دست آمد. براساس نتایج جدول‌های آنالیز واریانس، مقادیر عدد پی برای مدل ارائه شده کمتر از ۰/۰۵ بود. مقدار  $R^2$  بالای پاسخ فرایند (۰/۹۵۳۰) نشان می‌دهد داده‌های واقعی با داده‌های پیش‌بینی شده به‌طور رضایت‌بخشی متناسبند. در شرایط بهینه راندمان حذف سی او دی ۹۶/۳۶ درصد بود. برای اطمینان از درستی شرایط بهینه، سه آزمایش انجام گرفت. نتایج صحت مدل را با خطای بسیار کم تأیید کردند.

بهبود عملکرد یک سامانه به‌منظور افزایش بازده فرایند بدون افزایش هزینه، امری مهم است. روش استفاده‌شده برای این هدف بهینه‌سازی نامیده می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، پارامترهای فرایند برای حصول بیشترین راندمان اس بی آر بهینه‌سازی شدند. راندمان حذف سی او دی در شرایط بهینه درجه سانتی‌گراد  $A=27/86$ ، (گرم در مترمکعب در روز)  $B=31/56$ ، سانتی‌متر  $C=0/02$  و لجن سازگاریافته به سی او دی زیاد (SBR<sub>p</sub>) به ۹۶/۳۶ درصد رسید. در شرایط بهینه، سه آزمایش اضافی انجام گرفت تا توافق بین نتایج مدل و آزمایش‌ها را برای اس بی آر تأیید کند. راندمانهای حذف به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها و مدل دارای اختلاف بسیار کمی (حدود ۵ درصد خطا) بود.

#### ۴. جمع‌بندی

در این مطالعه، با استفاده از شیرابه حاصل از شست‌وشوی کود گاوی به‌عنوان منبع لجن، اثر همزمان پارامترهای دما،

#### مراجع

- [۱]. منزوی، م. ت. (۱۳۸۲). "فاضلاب شهری: تصفیه فاضلاب"، چاپ نهم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- [2]. Dapena-Mora A., Campos J.L., Mosquera-Corral, A., Jetten, M.S.M., Mendez, R. (2004). "Stability of the Anammox process in a gas-lift reactor and a SBR", *Journal of Biotechnology*, 110 (2), 159–170.
- [3]. Annachhatre, Ajit P., Amatya Prasanna, L. (2000). "UASB treatment of Tapioca Starch wastewater", *Journal of Environmental Engineering*, 126 (12), 1149-1152.
- [4]. Ferraz Fernanda, M., Bruni Aline, T., Bianchi Vanildo, L. (2009). "Performance of an Anaerobic Baffled Reactor (ABR) in treatment of cassava wastewater", *Brazilian Journal of Microbiology*, 40 (1), 48-53.
- [5]. Rajasimman, M., Karthikeyan, C. (2007). "Aerobic digestion of starch wastewater in a fluidized bed bioreactor with low density biomass support", *Journal of Hazardous Materials*, 143 (1-2), 82–86.
- [6]. Chen J. Paul, Kim, S.L., Ting, Y.P. (2004). "Anaerobic Ponds Treatment of Starch Wastewater: Case Study in Thailand", *Bioresource Technology*, 95 (2), 135-143.
- [7]. Singh, Mohini, Srivastava, R. K. (2011). "Sequencing batch reactor technology for biological wastewater treatment: a review", *Asia-pacific Journal of chemical Engineering*, 6 (1), 3–13.
- [8]. Ganesh, R., Balaji, G., Ramanujam, R.A. (2005). "Biodegradation of tannery wastewater using sequencing batch reactor-Respirometric assessment", *Bioresource Technology*, 97 (15), 1815-1821.
- [9]. Douglas C., Montgomery, (1991). "Design and Analysis of Experiments", 3th. Edition, John Wiley and Sons Co., New York.
- [10]. Myers R.H., Montgomery D.C. (2002). "Response Surface Methodology, process and product Optimization using designed experiments", 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley and Sons Co. New York.
- [11]. Chen M.J., Chen K.N., Lin C.W. (2005). "Optimization on response surface models for the optimal manufacturing conditions of dairy tofu", *Journal Food Engineering*, 68 (4), 471-480.
- [12]. Karacan F., Ozden U., Karacan S. (2007). "Optimization of manufacturing conditions for activated carbon from Turkish lignite by chemical activation using response surface methodology", *Applied Thermal Engineering*, 27 (7), 1212-1218.

- [13]. Sharma S., Malik A., Satya S. (2009). "Application of response surface methodology (RSM) for optimization of nutrient supplementation for Cr (VI) removal by *Aspergillus lentulus* AML05", *Journal of Hazardous Materials*, 164 (2-3), 1198-1204.
- [14]. Ravikumar K., Pakshirajan K., Swaminathan T., Balu K. (2005). "Optimization of batch process parameters using response surface methodology for dye removal by a novel adsorbent", *Chemical Engineering Journal*, 105 (3), 131-138.
- [۱۵]. گوهری احسان آباد، ج.، مسعودی، س. م. ع.، سرگلزایی، ج. (۱۳۹۳). "بهینه‌سازی حذف نشاسته به روش آماری سطح پاسخ: بررسی تأثیر سی او دی ورودی، نوع لجن و تعداد دفعات خوراک دهی بر راندمان سیستم اس بی آر"، پانزدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، تهران.
- [۱۶]. زینلی، و.، سرگلزایی، ج.، مسعودی، س. م. ع. (۱۳۹۳). "تصفیه پساب حاوی نشاسته با استفاده از راکتور ناپیوسته متوالی (اس بی آر): بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ"، سومین همایش ملی فن‌آوری‌های نوین شیمی و مهندسی شیمی، قوچان.
- [17]. Hedayati Moghaddam A., Shayegan J., Sargolzaei J., Bahadori T. (2013). "Response surface methodology for modeling and optimizing the treatment of synthetic starchy wastewater using hydrophilic PES membrane", *Desalination and Water Treatment*, 51 (37-39), 7036-7047.
- [18]. Hu Linlin, Wang Jianlong, Wen Xianghua, Qian Yi. (2005). "Study on performance characteristics of SBR under limited dissolved oxygen", *Process Biochemistry*, 40 (1), 293-296.
- [19]. Daverey Achlesh, SuSin-Han, Huang Yu-Tzu, Lin Jih-Gaw. (2012). "Nitrogen removal from optoelectronic wastewater using the simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and denitrification (SNAD) process in sequencing batch reactor", *Bioresource Technology*, 113, 225-231.
- [۲۰]. تکدستان، ا.، خانی، م. ر.، پور امینی، ن.، پازوکی، م. (۱۳۸۶). "بررسی کارایی راکتور ناپیوسته متوالی در تصفیه فاضلاب در شرایط مختلف بهره برداری"، دهمین همایش ملی بهداشت محیط، همدان.
- [۲۱]. اسدی وایقان، ا.، علوی مقدم، س. م.، هاشمی، س. ج. (۱۳۸۸). "بررسی کارایی سیستم SBR-GAC در تصفیه با بار آلودگی بالا"، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، شیراز.
- [22]. Ganjidoust, H., Ayati, B. (2004). "Use of sequencing batch reactors (SBRs) in treatment of wood fiber wastewater", *Iranian Journal of Environmental Health Science Engineering*, 1 (2), 91-96.
- [23]. Mohd Nordin A., Puganeshwary P., Hamidi A. A. (2011). "Optimization of coagulation and dissolved air flotation (DAF) treatment of semi-aerobic landfill leachate using response surface methodology (RSM)", *Desalination*, 277 (1-3), 74-82.
- [24]. Baogang, Z., Jing, Z., Qi Yang, Chuanping, F., Yuling, Z., Zhengfang, Y., Jinren, N. (2012). "Investigation and optimization of the novel UASB-MFC integrated system for sulfate removal and bioelectricity generation using the response surface methodology (RSM)", *Bioresource Technology*, 124, 1-7.
- [25]. Kewu Pi, Min Xia, Xiong Yang, Pan Wu, Shuyu Chen, Meichen Yang, Andrea R. Gerson, (2014), "Optimization of COD decrease from tobacco wastewater by Ca/Mg/Al coagulant using", *Journal of Water Process Engineering*, 5, 166-171.
- [26]. Ghafari, S., Aziz, H.A., Isa, M.H., Zinatizadeh, A.A. (2009). "Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation-flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum", *Journal of Hazardous Materials*, 163 (2-3), 650-656.
- [27]. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association, Water Environment Federation. (2005). "Standards methods for the examination of water and wastewater", 21st Edition, Washington, D.C.
- [28]. Olmez T. (2009). "The optimization of Cr (VI) reduction and removal by electrocoagulation using response surface methodology", *Journal of Hazardous Materials*, 162 (2-3), 1371-1378.
- [29]. Joglekar, A.M., May, A.T. (1987). "Product excellence through design of experiments", *Cereal Foods World* 32, 857-868.

- [30]. Suntud Sirianuntapiboon, Suriyakit Yommee. (2006). "Application of a new type of moving bio-film in aerobic sequencing batch reactor (aerobic-SBR)", *Journal of Environmental Management*, 78 (2), 149–156.
- [31]. Kargi Fikret, Uygur Ahmet, (2003). "Nutrient loading rate effects on nutrient removal in a five-step sequencing batch reactor", *Process Biochemistry*, 39 (4), 507-512.
- [32]. Rajasimman, M., Karthikeyan, C. (2007). "Aerobic digestion of starch wastewater in a fluidized bed bioreactor with low density biomass support", *Journal of Hazardous Materials*, 143 (1-2), 82–86.
- [33]. Zhu XJ, Gao TY, Zhou ZY. (1997). "Full scale study of nitrogen and phosphorus removal by low DO activated sludge processes", *China Water Wastewater*, 1997(13), 12–15.
- [34]. Karkman, A., Mattila, K., Tamminen, M., Virta, M. (2011). "Cold temperature decreases bacterial species richness in nitrogen-removing bioreactors treating inorganic mine waters", *Biotechnology Bioengineering*, 108 (12), 2876-2883.
- [35]. Kayranli, B., Ugurlu, A. (2011). "Effects of temperature and biomass concentration on the performance of anaerobic sequencing batch reactor treating low strength wastewater", *Desalination*, 278 (1-3), 77-83.
- [36]. Yanping Jia, Chao Gao, Lanhe Zhang, Guiquan Jiang, (2012). "Effects of Pre-fermentation and Influent Temperature on the Removal Efficiency of COD,  $\text{NH}_4^+$  – N and  $\text{PO}_4^{3-}$  – P in Slaughterhouse Wastewater by Using SBR", *Energy procedia*, 16, 1964-1971.