

حذف آلاینده ۴- نیترو فنول به روش راکتور بیولوژیکی بستر متحرک با مدیای Bee Cell 2000 و مطالعه شوک پذیری راکتور

مهدی قادری^۱، علی عطارزاده^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی عمران محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم
^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم

دریافت: ۱۴۰۱/۳/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۲۰، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۶/۲۰

چکیده

هشدارهای زیست محیطی مرتبط با صنعت در سال‌های گذشته اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند که منجر به افزایش سرمایه‌گذاری برای حفاظت از محیط زیست شده. آلاینده‌های نفتی مانند ۴- نیترو فنول (Nitrophenol (4-NP)) از مشکلات اجتناب‌ناپذیری است که کشورهای نفت خیز با آن مواجه هستند. لذا یافتن راهبردی برای حذف ارزان قیمت این آلاینده‌ها از پساب، یکی از اولویت‌های اصلی صنعت نفت و محیط زیست جهانی است. یکی از روش‌هایی که برای تصفیه فاضلاب آلوده به ۴- نیترو فنول به کار می‌رود، استفاده از راکتورهای بیوفیلم بستر متحرک (Moving Bed Biological Reactor (MBBR)) است. پژوهش حاضر تلاش کرده تا محیط MBBR را برای تصفیه فاضلاب آلوده به ۴- نیترو فنول با استفاده از مدیای Bee Cell 2000 بررسی و شرایط بهینه گرمایی را برای این محیط تعیین و گزارش کند. ابتدا میکروارگانیسم‌ها با آلاینده‌ها سازگار شدند و سپس یک لایه بیوفیلم بر روی سطح محیط آکنه در راکتور تشکیل شد. به دنبال آن، با تغییر در غلظت COD اولیه (۳۰۰-۳۰۰۰ میلی گرم در لیتر)، زمان ماند (۸، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت)، دما (۲۵، ۲۰) درجه سانتی‌گراد) و نسبت پر شدن (۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد) بازدهی راکتور تعیین و مقایسه شد. بالاترین راندمان در ۴۸ ساعت برابر ۹۸ درصد برای راکتور با آکنه Bee Cell 2000 در نسبت پر شدن ۵۰ درصد و در کمترین غلظت COD ورودی (۴۰۰ میلی گرم در لیتر) مشاهده شد. راکتور در زمان ماند ۸۴ ساعت قادر به تصفیه فاضلاب آلوده به ۴- نیترو فنول در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود. همچنین با بررسی سینتک واکنش مشخص گردید این فرآیند از مدل سینتیک اصلاح شده مرتبه دوم Stover-Kincannon پیروی می‌کند.

کلیدواژه‌ها: آلاینده نفتی، ۴- نیترو فنول، مدیا، راکتور بیوفیلمی بستر متحرک، شوک، Bee Cell 2000.

۱- مقدمه

و آبریزان شناخته شده است. طی چند دهه اخیر، کاهش شیمیایی ترکیبات نیترو فنولی، به‌طور گسترده به‌عنوان روش حذف پیشرفته برای چنین رنگ‌های خطرناکی از مخازن آبی گزارش شده است (Din و همکاران، ۲۰۲۰).

نیترو فنول‌ها که ترکیبات آلی سمی، بازدارنده و زیست‌نسوزاند، به‌طور گسترده در صنایع شیمیایی برای ساخت آفت‌کش‌ها، رنگ‌ها و داروها مصرف می‌شوند و اغلب در پساب تصفیه-خانه‌های فاضلاب صنعتی مشاهده می‌شوند (Ma و همکاران، ۲۰۰۰).

۴- نیترو فنول دارای پایداری حرارتی و مقاومت بالا در برابر تخریب زیستی است، بنابراین، حذف آن از محلول‌های آبی ضروری است (Abdelhamid, ۲۰۲۱).

امروزه جمعیت اکثر کشورها به‌طور ویژه‌ای در حال افزایش است. کشورهایایی که عمده وابستگی‌شان در حوزه اقتصاد، به تولیدات نفتی است. این موضوع در کنار عدم وجود نظام منطقی مدیریت افزایش مصرف سوخت، منابع آب زیرزمینی و محیط زیست را در قطب‌های صنعتی به‌طور جدی مورد تهدید قرار داده است (Ghaderi و همکاران، ۲۰۱۹). از انواع ترکیبات مختلف آلاینده آب که عمدتاً از طریق فاضلاب‌های خام و پساب آن به منابع آبی راه پیدا می‌کنند، ترکیبات فنولی دارای اهمیت ویژه‌ای هستند و حتی می‌توانند از طریق طبیعی هم وارد منابع آب شوند (Ghaderi و همکاران، ۲۰۱۹؛ Ghaderi و همکاران، ۲۰۲۰). نیترو فنول که یکی از اعضای خانواده آلاینده‌های فنولی است، نوعی آلاینده سرطان‌زا است و به دلیل اثرات نامطلوب زیاد بر انسان

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۶-۶۷۳۲۷۷۳

آدرس ایمیل: ghaderi.m@qut.ac.ir (م. قادری)، attarzadeh@qut.ac.ir (ع. عطارزاده).

تصفیه بیوفیلمی با مدیای Bee Cell 2000 در حذف ۴- نیتروفنول ارزیابی شود.

۲- مواد و روش‌ها

در وهله اول در مقیاس آزمایشگاهی پایلوت ساخته و پس از آن لجن خط برگشت به دست آمده از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با آلاینده منطبق گردید. بدین صورت که ابتدا تمام خوراک اولیه به صورت گلوکز بود و به تدریج از میزان گلوکز کاسته و آلاینده ۴- نیتروفنول جایگزین آن شد. پس از تطابق، به بررسی حذف آلاینده ۴- نیتروفنول توسط راکتور پرداخته شد.

۲-۱- مشخصات پایلوت

۲-۱-۱- مخزن اصلی

مشخصات پایلوت مورد استفاده، در جدول (۱) آمده است. شکل (۱) و (۲) به ترتیب نمایی از راکتور قبل و بعد از راه‌اندازی را نشان می‌دهند.

جدول ۱- مشخصات راکتور مورد استفاده در تحقیق

جنس راکتور	پلکسی گلاس
ضخامت دیواره (mm)	۵
قطر داخلی (cm)	۲۱
قطر خارجی (cm)	۲۲
ارتفاع مؤثر (cm)	۶۱
ارتفاع کل (cm)	۹۰
حجم کل (lit)	۳۱/۱۵۶
حجم مؤثر (lit)	۲۱/۱۱۷



شکل ۱- راکتور قبل از راه‌اندازی

تلاش‌های زیادی برای بررسی روش‌های مختلف حذف این آلاینده صورت گرفته است که در ادامه به شرح برخی از آن‌ها می‌پردازیم:

طی مطالعات گذشته تأثیر به‌کارگیری نانو ذرات فلزی در کاهش ۴- نیتروفنول و تبدیل آن به ۴- آمینوفنول توسط سدیم بوروهیدرید، بررسی و توسط طیف‌سنجی UV-vis با دقت بالا مانیتور شده. نتایج نشان می‌داد که سینتیک به شدت به نسبت واکنش‌دهنده وابسته است (Iben Ayad و همکاران، ۲۰۰۰).

نانوذرات فلزی (NPs) در زمینه‌های تحقیقاتی متعددی مانند تحقیقات پزشکی و زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا دارای خواص بیوفیزیکی منحصربه‌فردی هستند که عمدتاً به دلیل سطح قابل دسترس بالای آن‌ها است. در میان انواع مختلف نانوذرات فلزی، پتانسیل AuNP های سنتز شده سبز برای حذف ۴- نیتروفنول در فاضلاب صنعتی و عوامل حشره‌کش ارزیابی شده و مکانیسم‌های عمل آن‌ها و اثرات غیر هدف استفاده از آن‌ها را روشن می‌کند (Teimouri و همکاران، ۲۰۱۸).

Levin و همکارانش توانایی سوبه *Trametes versicolor* BAFG 2234 برای تجزیه ۴- نیتروفنول در داخل بدن و در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات آن‌ها نشان داد *T.versicolor* در حضور ۰/۵ میلی مولار ۴- نیتروفنول رشد کرده و ۹۸/۴ درصد از این ترکیب سمی را در کمتر از ۹۶ ساعت تجزیه کرد (Levin و همکاران، ۲۰۱۶).

در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۴ حذف بالای ۷۵ درصد از ۴- نیتروفنول با ۲۵ Fe-MABs با استفاده از ۱۵۰ ppm پراکسید هیدروژن و ۴۰ دقیقه تابش به دست آمد، در حالی که حذف کل آن با استفاده از ۵۰۰ ppm پراکسید هیدروژن اتفاق افتاد (Barreca و همکاران، ۲۰۱۴).

مطالعه‌ای دیگر بر روی کاهش کاتالیستی ۴- نیتروفنول به ۴- آمینوفنول توسط بوروهیدرید سدیم در حضور نانوذرات فلزی در محلول آبی ارائه شده است که این واکنش که از طریق ۴- هیدروکسی آمینوفنول میانی انجام می‌شود. این ماده به وفور به عنوان یک واکنش مدل برای بررسی فعالیت کاتالیزوری نانوذرات فلزی استفاده شده است (Gu و همکاران، ۲۰۱۴).

لذا با بررسی مطالعات گذشته پیرامون حذف آلاینده ۴- نیتروفنول و باتوجه به کارایی مناسب راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک و با در نظر داشتن فاکتورهای زیادی که در حذف آلاینده‌های فنولی مطرح است، در این پژوهش تلاش شد تا دو عامل اصلی در یک راکتور بیولوژیکی یعنی میزان سمیت و مقاومت ساختار شیمیایی آلاینده ۴- نیتروفنول به صورت موردی در راکتور بیوفیلمی بستر متحرک حاوی آکنه Bee Cell 2000 در حذف این آلاینده بررسی و سعی شد تا قابلیت شوک‌پذیری راکتور مطرح

منظور در هر راکتور از یک پمپ هوا، با نرخ هوادهی ۸ لیتر بر دقیقه، استفاده شد.

۲-۲-۲- روش تحقیق

۱-۲-۲- انتخاب مواد

همه مواد شیمیایی مورد استفاده شامل O_2Si ، C_2Cl_4 ، $HgSO_4$ و سیلیکازل (Silica gel 60) و $K_2Cr_2O_7$ ، H_2SO_4 و Ag_2SO_4 جهت اندازه‌گیری COD، H_2SO_4 و $NaOH$ جهت تنظیم pH محلول در محدوده ۷/۵ تا ۶/۵ مناسب برای رشد میکروارگانیسم‌ها، بی‌کربنات آمونیوم (NH_4HCO_3) به‌عنوان منبع نیتروژن و ترکیب نمک‌های K_2HPO_4 ، KH_2PO_4 به‌عنوان منبع فسفر جهت تأمین نسبت COD:N:P برابر ۱:۵:۱۰۰، سولفات منیزیم ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)، کلرید کلسیم ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$)، کلرید آهن ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) و مولیبدات سدیم ($Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$) به‌عنوان ریزمغذی، از نوع آزمایشگاهی و محصول شرکت مرک^۱ بودند.

۲-۲-۲- تجهیزات

عمده‌ترین دستگاه‌های مورد استفاده به شرح زیر بودند:

اسپکتروفوتومتر برای اندازه‌گیری COD و غلظت ۴-

نیتروفنول

ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم

pH متر

کوره

آون جهت تعیین MLSS

پمپ‌های هوادهی (مورد استفاده در آکواریم‌های خانگی)

۲-۲-۳- روش اندازه‌گیری پارامترها

پارامترهای مطرح در این تحقیق به‌صورت آنچه در ادامه بیان می‌شود اندازه‌گیری شدند:

❖ غلظت ۴- نیتروفنول

یکی از روش‌های متداول برای اندازه‌گیری غلظت ۴- نیتروفنول در آب، روش طیف‌سنجی با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر است (Minz و همکاران، ۲۰۲۱؛ Cunha و همکاران، ۲۰۱۸؛ Ding و همکاران، ۲۰۲۰؛ Zhao و همکاران، ۲۰۲۱). ماده ۴- نیتروفنول در دو طول موج ۳۱۷nm و ۴۰۱nm دارای جذب بیشینه است (Kamal و همکاران، ۲۰۲۱).

در مقادیر pH کمتر از ۶، به این دلیل که ۴- نیتروفنول بیشتر در حالت پروتوناسیون شده وجود دارد، پیک جذب آن در طول موج ۳۱۷ نانومتر مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که در pH/۳ و کمتر همه مولکول‌های ۴- نیتروفنول در حالت پروتوناسیون شده قرار



شکل ۲- راکتور بعد از راه‌اندازی

۲-۱-۲- مشخصات آکنه

در راه‌اندازی راکتور با بستر متحرک، از آکنه Bee cell 2000 استفاده شد. در جدول (۲) خصوصیات آکنه استفاده شده و در شکل (۳) تصویری از این آکنه ارائه شده است.

جدول ۲- خصوصیات آکنه‌های مورد استفاده در تحقیق

پارامتر	Bee cell 2000
جنس آکنه	پلی‌استایرن
شکل	لانه زنبوری
چگالی (kg/m^3)	۹۵۰
رنگ	سفید
سطح ویژه برای رشد بیوفیلم (m^2/m^3)	۶۵۰



شکل ۳- تصویر آکنه مورد استفاده قبل از تشکیل بیوفیلم

۲-۱-۳- سیستم هوادهی

نقش هوادهی در راکتور MBBR علاوه بر تأمین اکسیژن مورد نیاز سوخت و ساز سلولی میکروارگانیسم‌ها، ایجاد اختلاط منایب برای آکنه‌های موجود در سراسر راکتور نیز می‌باشد. به همین

1. Merck

جدول ۳- مشخصات آزمایشات انجام شده در تحقیق

دستورالعمل	آزمایشات
۴۵۰۰-H+B	pH
۴۵۰۰-OG	اکسیژن محلول (DO)
۵۲۲۰-B	میزان اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)
۵۲۱۰-B	میزان اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD5)
۲۵۴۰-D	جامدات معلق مایع مخلوط (MLSS)
۲۵۴۰-E	جامدات معلق فرار مایع مخلوط (MLVSS)

۳-۲- راه اندازی و بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد راکتورها

۳-۲-۱- راه اندازی سیستم MBBR

مرحله اول کار پس از ساخت، نصب و آب بندی پایلوت، راه-اندازی آن بود. هدف از راه اندازی بیوراکتور ایجاد فیلم میکروبی یا بیوفیلم در داخل آکنه ها و نهایتاً رسیدن به حالت پایداری پایش بود. با توجه به استفاده از فاضلاب سنتتیک و تجزیه پذیری سخت ۴- نیترو فنول، مرحله سازگاری میکروارگانیسم ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

به منظور راه اندازی پایلوت، حدود یک سوم از حجم بیوراکتور از لجن غلیظ تهیه شده از جریان برگشتی حوض لجن فعال تصفیه خانه فاضلاب شهری پر شد؛ و مابقی حجم بیوراکتور با محلول آب و گلوکز با COD معادل ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر به حجم رسانده شد. همچنین بعد از راه اندازی بیوراکتور نیز یکسری آزمایشات انجام گردید که نتایج آن در جدول (۴) آمده است.

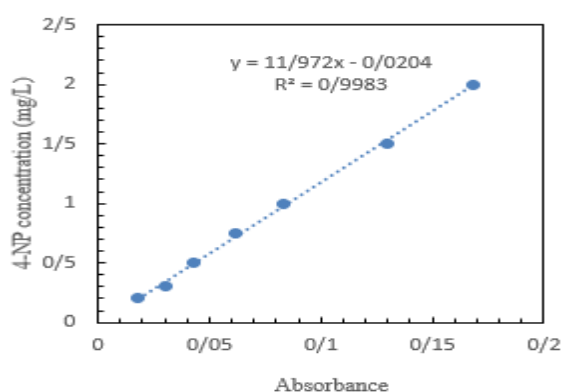
جدول ۴- مشخصات لجن استفاده شده جهت راه اندازی راکتور

پارامتر	میزان
pH	۷/۲
درجه حرارت (°C)	۱۹
اکسیژن محلول (mg/L)	۱/۴
مواد جامد معلق مایع مخلوط (mg/L)	۴۱۱۲
مواد جامد معلق فرار مایع مخلوط (mg/L)	۳۳۳۱

برای تهیه خوراک سنتتیک در دوره سازگاری از گلوکز (C₆H₁₂O₆.H₂O) به عنوان منبع کربن، بی کربنات آمونیوم (NH₄HCO₃) به عنوان منبع نیتروژن و ترکیب نمک های K₂HPO₄، KH₂PO₄ به عنوان منبع فسفر استفاده شد تا نسبت COD:N:P=۱۰۰:۵:۱ در خوراک تنظیم شود. مطابق با منابع علمی موجود و به منظور رشد میکروارگانیسم ها علاوه بر گلوکز و ماکرونوترینت های مذکور، از سولفات منیزیم (MgSO₄.7H₂O)، کلرید کلسیم (CaCl₂.2H₂O)، کلرید آهن (FeCl₃.6H₂O) و مولیبدات سدیم (Na₂MoO₄.2H₂O) به ترتیب به میزان ۵، ۳/۷۵، ۱، ۱/۲۶ میلی گرم بر لیتر به عنوان ریز مغذی در ساخت فاضلاب سنتزی استفاده شد (حائری و همکاران، ۱۴۰۰).

دارند. از سوی دیگر، در pH ۱۰ و بالاتر بیشترین جذب این ماده در حدود طول موج ۴۰۱nm رخ می دهد، این امر تأیید می کند که در pH های بالا مولکول های ۴- نیترو فنول به حالت آنیونی تغییر شکل می دهند (Kamal و همکاران، ۲۰۲۱).

بنابراین برای اندازه گیری غلظت ۴- نیترو فنول در آب، pH محلول باید در یکی از حالات اسیدی یا بازی تنظیم شود. برای این منظور قبل و بعد از تصفیه، هر بار ۵ میلی لیتر نمونه از محلول برداشته شد. برای تنظیم pH، هر نمونه با استفاده از آب مقطر ۱۰ برابر رقیق و به حجم ۵۰ میلی لیتر رسانده شد. سپس با افزودن میزان کافی محلول ۰/۰۱M HCL در حدود ۴/۳ تنظیم شد و با استفاده از منحنی استاندارد که از پیش در غلظت های ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵ و ۲ رسم شده بود (شکل (۱)) غلظت آن محاسبه شد.



شکل ۱- منحنی استاندارد جذب ۴-NP در طول موج ۳۱۷nm و ۴/۳pH

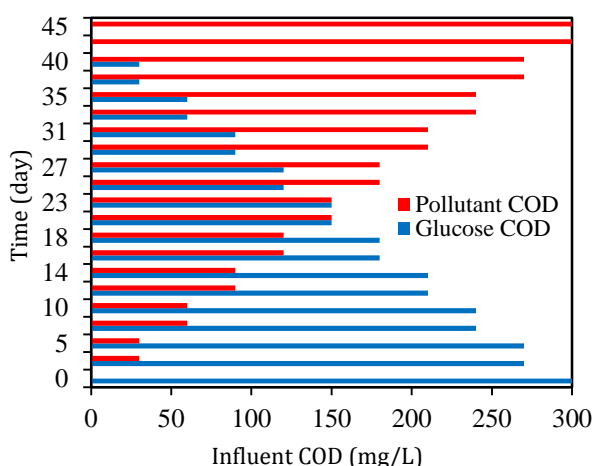
راندمان حذف ۴- نیترو فنول در زمان t از تصفیه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\eta_p = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

که در آن η_p راندمان حذف ۴- نیترو فنول و C_0 و C_t به ترتیب غلظت اولیه ۴- نیترو فنول (غلظت در زمان صفر تصفیه) و غلظت ۴- نیترو فنول در زمان t تصفیه می باشند.

❖ سایر پارامترها

در جدول (۳) انواع آزمایشات به کار برده شده در تحقیق و دستورالعمل های مربوطه آمده است (Greenberg و همکاران، ۲۰۰۰).



شکل ۲- روند بارگذاری در مرحله سازگاری
(COD = ۳۰۰mg/L)

۲-۳-۳-۲- افزودن آکنه‌ها به سیستم MBBR و تشکیل بیوفیلم بر روی آن‌ها

مکانیسم حذف آلاینده در سیستم MBBR بر پایه میکروارگانیسم‌های چسبیده به آکنه‌ها موجود در سیستم می‌باشد. براین اساس در طول مرحله سازگاری، حدود ۵۰ درصد حجم راکتور با آکنه Bee Cell 2000 پر شد. با گذشت زمان، لایه بیولوژیکی (بیوفیلم) بر روی سطح داخلی آکنه‌ها ایجاد شد. در ادامه با توجه به تشکیل بیوفیلم بر روی آکنه‌ها، افزایش میزان COD به‌طور منظم انجام شد و راندمان حذف آلاینده‌ها نیز به‌دست آمد.

۲-۳-۴- اثر میکروارگانیسم‌های معلق

در سیستم‌های بیوفیلمی تعدادی از میکروارگانیسم‌ها به‌دلیل پدیده جدایش در حجم راکتور معلق هستند. به‌منظور بررسی اثر میکروارگانیسم‌های معلق در تصفیه ترکیبات نفتی، فاضلاب سیستم به آرامی از پایین‌ترین خروجی راکتور تخلیه شد. سپس با جریان بسیار آرام، راکتور پر شدند و خوراک به سیستم تزریق شد. هدف از این کار خارج کردن میکروارگانیسم‌های معلق در راکتور و بررسی مجدد راندمان حذف توسط بیوفیلم متصل به آکنه‌ها بود.

۲-۳-۵- نمونه برداری جهت انجام آنالیز

روش نمونه‌گیری و انجام آنالیزها بدین صورت بود که پس از طی زمان ماند، پمپ هوادهی خاموش شده تا آکنه‌ها و لجن معلق در راکتور ته‌نشین شوند. در ادامه حدود ۱۰۰ mL از پساب قسمت فوقانی راکتور توسط شیر مربوطه برداشت و جهت انجام آنالیز ۴- نیتروفنول (Gao و همکاران، ۲۰۱۶؛ Sajadi و همکاران، ۲۰۱۸؛

لازم به‌ذکر است که مقدار COD ورودی در ابتدای مرحله راه-اندازی برابر با ۳۰۰ mg/L انتخاب گردید، که کربن آن در اوایل از گلوکز و در دوره سازگاری از گلوکز و آلاینده ۴- نیتروفنول و در آزمایشات اصلی از آلاینده ۴- نیتروفنول تنها تأمین می‌گردید.

۲-۳-۲- سازگار نمودن میکروارگانیسم‌ها با فاضلاب سنتزی

در تمامی سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی، اولین مرحله در راه-اندازی فرآیندها، تطبیق میکروارگانیسم‌ها با فاضلاب مورد نظر است. این امر به‌خصوص برای ترکیبات سخت تجزیه‌پذیری مانند ۴- نیتروفنول که خواص سمیت و سخت تجزیه‌پذیری را نیز در خود دارند از اهمیت بالاتری برخوردار است؛ زیرا در صورت خوگرفتن مناسب میکروارگانیسم‌ها با محیط است که اکسیداسیون بیولوژیکی روی می‌دهد. در غیر این صورت راندمان حذف ترکیبات آلی و تصفیه فاضلاب بسیار پایین و عملاً بازدهی مناسبی نخواهد داشت (Delnavaz و همکاران، ۲۰۰۸).

همان‌گونه که ذکر شد در مرحله اول سازگاری گلوکز با COD معادل ۳۰۰ mg/l به سیستم تزریق گردید. در ادامه برای سازگار کردن لجن با فاضلاب سنتزی، در یازده مرحله به تزریق فاضلاب حاوی غلظت‌های مختلف از آلاینده ۴- نیتروفنول اقدام شد، به این صورت که در مرحله دوم COD معادل ۳۰۰ mg/l به سیستم تزریق شد؛ که در اولین باردهی ترکیبات آلاینده به راکتور، سهم بار آلی آلاینده و گلوکز به‌ترتیب برابر ۱۰ درصد و ۹۰ درصد انتخاب شد. در ادامه نیز نسبت بار آلی ۴- نیتروفنول به گلوکز به‌ترتیب به‌میزان ۲۰+۸۰، ۷۰+۳۰، ۲۰+۸۰، ۱۰+۹۰ و ۱۰۰+۰ درصد به سیستم تزریق شد (شکل ۲) و راندمان حذف COD در انتهای زمان ماند (۲۴ ساعت) در هر مرحله مورد بررسی قرار گرفت.

با هر بار افزایش غلظت ۴- نیتروفنول تکرار بارگذاری تا رسیدن به حالت پایدار ادامه یافت. به‌طوری‌که در ابتدای راه‌اندازی بیوراکتورها با اندازه‌گیری راندمان حذف COD، حذف آلاینده توسط میکروارگانیسم‌ها مورد بررسی قرار می‌گرفت و هر غلظت چندین بار تکرار می‌شد تا راندمان حذف تقریباً ثابت حاصل شود، آنگاه اقدام به افزایش مجدد غلظت ۴- نیتروفنول می‌شد. ثابت ماندن غلظت COD در هر غلظت، نشان‌دهنده سازگاری میکروارگانیسم‌ها برای غلظت مربوطه بود. با این روش اگرچه زمان نسبتاً طولانی‌تری برای سازگاری میکروارگانیسم‌ها صرف شد، اما نتیجه کار از اطمینان کافی برخوردار بود. به‌طورکلی افزایش راندمان حذف نشان‌دهنده تطبیق میکروارگانیسم‌ها است.

۲-۳-۸- بررسی راندمان حذف آلاینده در شرایط شوک ورودی به سیستم

در این تحقیق اثر استفاده از آکنه بر میزان شوک‌پذیری سیستم بیولوژیکی آکنه Bee Cell 2000 با افزایش ۲۰۰۰ میلی-گرم برلیتر در میزان COD ورودی به راکتورها (هنگامی که راکتورها به راندمان زیر ۵۰ درصد در آزمایشات اصلی رسیدند) بررسی شد و نحوه بازگشت آن به شرایط قبلی مورد مطالعه قرار گرفت.

۲-۳-۹- سینتیک واکنش‌های بیولوژیکی

در این پژوهش به منظور بررسی سینتیک واکنش‌های بیولوژیکی سیستم در حذف آلاینده، از مدل سینتیک Stover-Kincannon استفاده گردید (آیتی و همکاران، ۱۳۸۹؛ دنواز و همکاران، ۱۳۸۸).

مدل Stover-Kincannon به صورت رابطه (۲) بیان می‌گردد که در آن U_{max} و K_B به ترتیب سرعت حذف حداکثر و میزان ثابت اشباع می‌باشند (Stover و Kincannon، ۱۹۸۲):

$$\frac{dS}{dt} = \frac{U_{max} \left(\frac{QS_0}{V} \right)}{K_B + \left(\frac{QS_0}{V} \right)} \quad (2)$$

با نوشتن موازنه جرم در اطراف سیستم‌ها و خطی‌سازی معادلات، رابطه (۳) بدست می‌آید:

$$\left(\frac{dS}{dt} \right)^{-1} = \frac{\theta_H}{S_0 - S} = \frac{K_B}{U_{max}} \left(\frac{\theta_H}{S_0} \right) + \frac{1}{U_{max}} \quad (3)$$

در این تحقیق از رابطه (۳) جهت بررسی میزان تطابق سینتیک واکنش‌های بیولوژیکی سیستم‌ها با مدل سینتیک Stover-Kincannon استفاده شد. بدین منظور، داده‌های مربوط به حذف آلاینده از سیستم‌ها در نموداری با محور افقی θ_H/S_0 و محور قائم $\theta_H/(S_0 - S)$ رسم گردید و پس از برازش خطی راست، ضریب همبستگی سیستم‌ها با مدل مرتبه دوم Stover-Kincannon بدست آمد.

۲-۴- طراحی آزمایش‌ها و روش تحلیل آماری و بررسی میزان اثر پارامترها

فرایندهای بیولوژیکی به دلیل ماهیت رفتار میکروارگانیسم‌ها که موجوداتی زنده هستند و با شرایط ممکن است بمیرند و یا عملکردشان غیرطبیعی گردد به راحتی با روش هاس مرسوم و متداول طراحی آزمایش قابلیت تعیین شرایط آزمایش را ندارند. در این تحقیق آزمایشات اصلی به روش یک متغیر در زمان

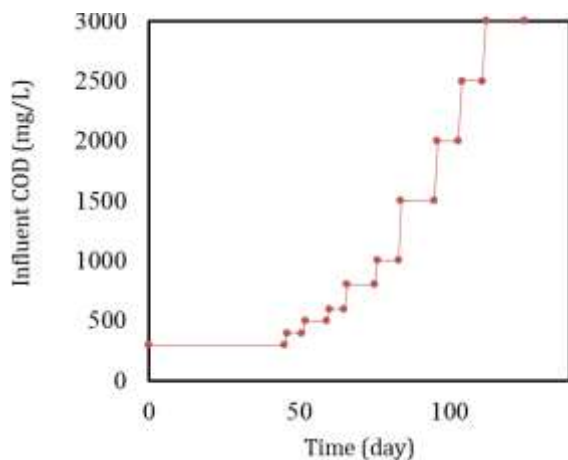
Shah و همکاران، ۲۰۲۰) و COD (Gzar و همکاران، ۲۰۲۱) استفاده گردید.

۲-۳-۶- پارامترهای کنترلی

با توجه به هوای بودن فرآیند مورد استفاده، تأمین اکسیژن مورد نیاز سوخت‌وساز سلولی برای میکروارگانیسم‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. به همین دلیل با انجام آزمایشات منظم در طول مدت تحقیق، مقدار این پارامتر به همراه pH در حد استاندارد نگه داشته شد.

۲-۳-۷- پارامترهای مورد بررسی در آزمایشات اصلی

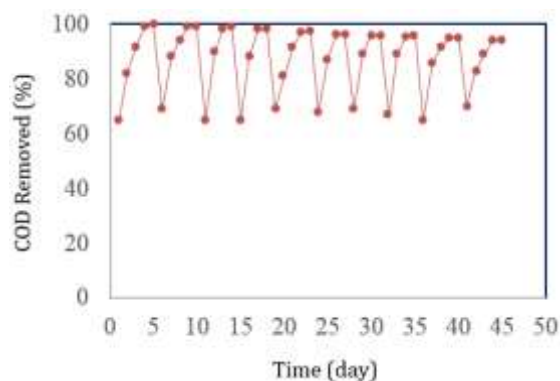
پس از اتمام دوره سازگارسازی، آزمایشات اصلی انجام گرفت و در این دوره اثر میزان COD ورودی در سطوح ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (در سطوح ۸، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت) مورد مطالعه قرار گرفت و همچنین اثر درصد پرشدگی راکتور (در سه سطح ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد) در COD ورودی برابر با ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بررسی گردید. روند افزایش COD ورودی به راکتور در طول دوره سازگارسازی و آزمایشات اصلی در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۳- روند افزایش COD ورودی به راکتور در طول دوره سازگارسازی و آزمایشات اصلی

همچنین پارامترهای F/M و MLVSS/MLSS به طور مرتب بررسی گردید و نتایج آن در فصل بعد ارائه گردیده است.

در انتهای دوره سازگاری به ۹۴ درصد رسید. به‌طور کلی مرحله سازگاری و انطباق میکروارگانیسم‌ها با آلاینده ۴۵ روز به‌طول انجامید.



شکل ۴- راندمان حذف COD در دوره سازگاری
($COD_{in} = 300 \text{ mg/L}$)

۳-۳- تشکیل بیوفیلم بر روی آکنه‌ها

با شروع دوره سازگاری در راکتورهای بیولوژیکی MBBR، روی سطح داخلی آکنه‌ها بیوفیلم (شکل (۴)) تشکیل شد. با توجه به شکل ظاهری آکنه‌های مورد استفاده ابتدا بیوفیلم در داخل آکنه‌ها تشکیل و به مرور زمان لایه‌های بیوفیلمی نازکی در زوایای سطح خارجی برخی از آکنه‌ها مشاهده شد؛ علت این پدیده را می‌توان تنش برشی ناشی از سیال هنگام حرکت آکنه و برخورد آکنه‌ها حین حرکت در راکتور دانست. این تنش برشی سبب شستگی مداوم میکروارگانیسم‌های چسبیده به سطح خارجی می‌شود و در زوایای سطح داخلی شرایط مناسب‌تری برای باقی ماندن میکروارگانیسم حاکم است. با افزایش ضخامت بیوفیلم تشکیل شده، وزن لایه سبب جدا شدن میکروارگانیسم‌های چسبیده از سطح آکنه می‌شود و بر این اساس ارائه عددی به عنوان ضخامت بیوفیلم سطح داخلی آکنه‌های معلق ممکن نیست.



شکل ۴- تصویری از آکنه‌ها پس از تشکیل بیوفیلم Bee Cell
2000

(OFAT)^۲ طراحی و انجام گردید که این روش در بسیاری مطالعات بیولوژیکی پیشین نیز استفاده شده است (آیتی و همکاران، ۱۳۸۹؛ دنواز و همکاران، ۱۳۸۸).

امروزه در تحقیقات مختلف در زمینه مهندسی محیط زیست به بررسی جامع پارامترها و تعیین اثر عوامل متداخل و تأثیر و سهم هر عامل بر اساس یک روش محاسباتی دقیق توجه پرداخته شده است (Ebrahimi Ghadi و همکاران، ۲۰۱۹؛ Yavari و Qaderi، ۲۰۲۰). روش سطح پاسخ یک روش متداول و قابل اعتماد در این زمینه است (Qaderi و Tamadoni، ۲۰۱۹؛ Qaderi و Khalegh، ۲۰۱۹). در این تحقیق پس از بررسی نتایج بررسی یک پارامتر در زمان، به منظور بررسی جامع پارامترها و تعیین اثر عوامل متداخل و تأثیر و سهم هر عامل و تحلیل دقیق تر علت و معلولی نتایج و بررسی آماری دقیق تر از روش سطح پاسخ^۳ جهت طراحی آزمایش‌های نهایی استفاده شد. در این قسمت متغیرهای مستقل مورد بررسی به شرح جدول (۵) بودند و نتایج حذف COD به‌عنوان متغیر وابسته مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۵- متغیرهای مستقل مطرح در روش سطح پاسخ

متغیر	سطوح پارامترها		
	+۱	۰	-۱
زمان ماند (ساعت)	۲۴	۱۸	۱۲
غلظت آلاینده (میلیگرم بر لیتر)	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۰۰۰
درصد پرشدگی آکنه	۶۰	۴۵	۳۰

۳- نتایج

۳-۱- دوره سازگاری میکروارگانیسم‌ها

نتایج مربوط به راندمان در دوره سازگاری در این قسمت بیان شده است.

۳-۲- راندمان حذف در دوره سازگاری میکروارگانیسم‌ها

همان‌طور که در فصل قبل بیان شد، در این دوره، با کاهش غلظت گلوکز، غلظت ۴- نیتروفتول افزایش یافته تا مقدار بار آلی ورودی ثابت بماند. شکل (۴) راندمان حذف COD بر حسب زمان در دوره سازگاری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴)، با هر بار افزایش غلظت ۴- نیتروفتول راندمان حذف کاهش می‌یافت و با تکرار بارگذاری، راندمان بهبود و در نهایت در حالت پایا به راندمان ثابتی می‌رسید و به‌طور کلی در غلظت‌های مختلف دوره سازگاری، راندمان حالت پایا تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشت. لذا تفاوت راندمان حالت پایا در دو بارگذاری متوالی هیچگاه از مقدار ۳ درصد تجاوز نکرد و به‌طور میانگین ۴ روز برای رسیدن به حالت پایا با هر بار افزایش بار نیاز بود. لازم به ذکر است که درصد حذف COD

۳-۴- اثر افزایش بار ورودی

در این تحقیق اثر افزایش بار ورودی بر راندمان حذف COD و راندمان حذف ۴- نیتروفنول در حذف بیولوژیکی آن به وسیله میکروارگانسیم‌های موجود، در راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک حاوی آکنه Bee Cell 2000 بررسی گردید. در دوره آزمایشات اصلی بار آلی ورودی به راکتورها تا COD معادل ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر با افزایش پله‌ای حداکثر ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در هر دوره بارگذاری و از COD معادل ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تا رسیدن به بالاترین COD ورودی به صورت پله‌ای و با گام 500 mg/L افزایش یافت.

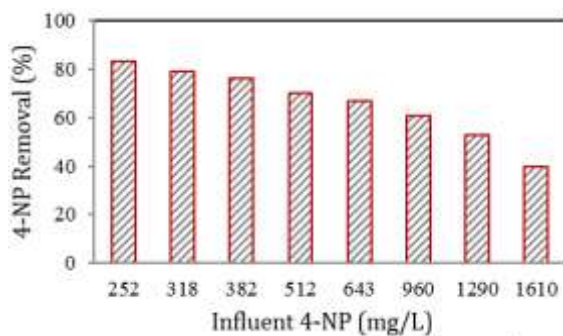
۳-۵- اثر افزایش بار ورودی بر راندمان حذف COD

شکل (۵) راندمان حذف COD بر حسب COD ورودی را در دوره آزمایش‌های اصلی در زمان ماند ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. با دقت در شکل (۵) ملاحظه می‌شود که در بارگذاری اولیه تا COD معادل 1000 mg/L راندمان حذف در راکتور روند کاهشی یکنواختی داشته است، به نحوی که در COD معادل 600 mg/L این راندمان در مدت ۲۴ ساعت برابر با ۷۷ درصد، همچنین در COD معادل 800 mg/L این راندمان در مدت ۲۴ ساعت برابر با ۷۱ درصد می‌باشد. در COD معادل 1000 mg/L راندمان حذف در زمان ماند ۲۴ ساعت برابر با ۶۸ درصد مشاهده شد و این مقادیر برای COD معادل 1500 mg/L به میزان ۶ درصد برای زمان ماند ۲۴ ساعت نسبت به COD ورودی 1000 mg/L میلی‌گرم بر لیتر کاهش داشته است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین راندمان حذف مربوط به COD ورودی معادل 400 mg/L در راکتور حاوی آکنه-های مورد بررسی می‌باشد.

۳-۶- اثر افزایش بار ورودی بر راندمان حذف ۴- نیتروفنول

در این بخش راندمان حذف راکتورهای بیولوژیکی در زمان ماند ۲۴ ساعت در بارگذاری غلظت ۴- نیتروفنول از ۲۵۲ تا 1610 mg/L میلی‌گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به صورت شکل (۶) ارائه شده است.

با دقت در شکل (۶) ملاحظه می‌شود که با افزایش بارگذاری، راندمان حذف ۴- نیتروفنول برای راکتور روند نزولی داشته، به گونه‌ای که برای راکتور افزایش غلظت ورودی ۴- نیتروفنول از ۲۵۲ به 512 mg/L میلی‌گرم بر لیتر میزان راندمان حذف از ۸۳ به ۷۰ درصد رسید که ۱۳ درصد کاهش یافته است. همچنین با افزایش غلظت ورودی از 512 mg/L به 960 mg/L میلی‌گرم بر لیتر راندمان حذف از ۷۰ به ۶۱ درصد رسید. در بازه افزایش غلظت از 960 mg/L به 1610 mg/L میلی‌گرم بر لیتر راندمان حذف ۴۰ درصد رسید. بر اساس نتایج COD و ۴- نیتروفنول می‌توان غلظت COD برابر با 400 mg/L میلی‌گرم بر لیتر و غلظت آلاینده ورودی برابر با 252 mg/L میلی‌گرم بر لیتر را به عنوان مقدار بهینه برای بار آلی ورودی برای هر راکتورهای بیولوژیکی حاوی آکنه Bee Cell 2000 در نظر گرفت.



شکل ۶- تغییرات راندمان حذف ۴- نیتروفنول در غلظت‌های مختلف (زمان ماند ۲۴ ساعت و درصد پرشدگی ۵۰ درصد)

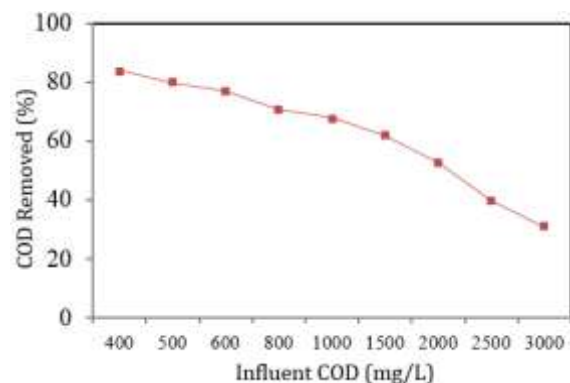
۳-۷- بررسی اثر زمان ماند

در این بخش اثر زمان ماند ۸، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت، بر راندمان حذف آلاینده در بارگذاری مختلف از COD معادل ۴۰۰ تا 3000 mg/L میلی‌گرم بر لیتر در راکتور بررسی گردید. همچنین تغییرات راندمان حذف آلاینده در زمان ماند ۲۴ و ۴۸ ساعت در غلظت ۴- نیتروفنول ورودی به راکتور از ۲۵۲ تا 1610 mg/L میلی‌گرم بر لیتر نیز مورد مطالعه قرار گرفت.

۳-۷-۱- بررسی اثر زمان ماندهای مختلف بر راندمان حذف

COD

با توجه به نتایج شکل (۷) در راکتور مورد بررسی در این تحقیق، هر چه زمان ماند بیشتر باشد راندمان حذف نیز به تبع آن بالاتر می‌رود.



شکل ۵- تغییرات راندمان حذف COD در COD های مختلف (درصد پرشدگی ۵۰ درصد، زمان ماند ۲۴ ساعت)

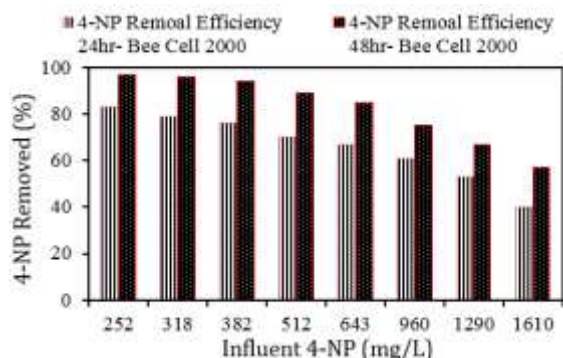
۳-۷-۲- بررسی اثر زمان ماند های مختلف بر راندمان حذف ۴- نیتروفنول

در طی تزریق آلاینده به راکتور، غلظت ۴- نیتروفنول و COD اندازه گیری شد و نتایج حاصل برای راکتور حاوی آکنه Bee Cell 2000 در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- راندمان حذف ۴- نیتروفنول در راکتورهای تحقیق در غلظت های ۴- نیتروفنول ورودی و زمان ماند های مختلف (درصد پرشدگی ۵۰ درصد)

راندمان حذف غلظت ۴- نیتروفنول (%)		COD ورودی (mg/L)	غلظت ۴- نیتروفنول ورودی (mg/L)
۲۴ (hr)	۴۸ (hr)		
۸۳	۹۷	۴۰۰	۲۵۲
۷۹	۹۶	۵۰۰	۳۱۸
۷۶	۹۴	۶۰۰	۳۸۲
۷۰	۸۹	۸۰۰	۵۱۲
۶۷	۸۵	۱۰۰۰	۶۴۳
۶۱	۷۵	۱۵۰۰	۹۶۰
۵۳	۶۷	۲۰۰۰	۱۲۹۰
۴۰	۵۷	۲۵۰۰	۱۶۱۰
۲۹	۴۲	۳۰۰۰	۱۹۴۰

راندمان حذف ۴- نیتروفنول در دوره بهره برداری در شکل (۸) آورده شده است. با دقت در شکل روند کاهشی در راندمان حذف غلظت ۴- نیتروفنول های ورودی اعمال شده به راکتورهای مورد بررسی در تحقیق مشاهده شد، به نحوی که با افزایش غلظت ۴- نیتروفنول ورودی از ۲۵۲ به ۱۶۱۰ میلی گرم بر لیتر در زمان ماند های ۲۴ و ۴۸ ساعت راندمان حذف آلاینده به ترتیب ۴۳ و ۴۰ درصد کاهش یافت.

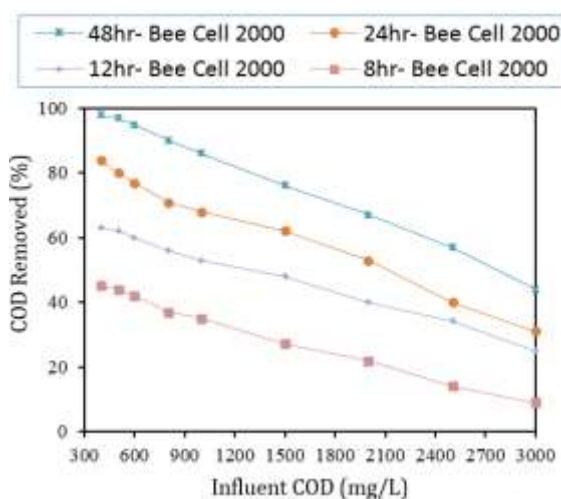


شکل ۸- تغییرات راندمان حذف ۴- نیتروفنول در زمان ماند و غلظت های ۴- نیتروفنول ورودی مختلف (پرشدگی ۵۰ درصد)

راندمان حذف در محدوده COD معادل ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی گرم بر لیتر در زمان ماند ۴۸ ساعت در راکتور مورد بررسی قابل توجه بود به طوریکه در زمان ماند ۴۸ ساعت، راندمان ۹۸ درصد در COD معادل ۴۰۰ mg/L و راندمان ۷۶ درصد در COD معادل ۱۵۰۰ mg/L مشاهده شد.

همان طور که در شکل (۷) قابل مشاهده است، برای زمان ماند ۴۸ ساعت، از COD ورودی بیشتر از ۱۵۰۰ mg/L، کاهش راندمان قابل توجهی رخ می دهد؛ به نحوی که کاهش راندمان حذف COD، بین COD ورودی معادل ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی گرم بر لیتر، در زمان ماند ۴۸ ساعت برابر با ۳۲ درصد در راکتور حاوی آکنه Bee Cell 2000 مشاهده شد.

بر اساس نتایج به دست آمده، قابلیت تصفیه پذیری و دارا بودن بالاترین راندمان حذف بار آلی در بارگذاری برابر با COD معادل ۴۰۰ mg/L در راکتور قابل مشاهده است. به گونه ای که بیشترین راندمان حذف در زمان ماند های ۸، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت، در بارگذاری COD معادل ۴۰۰ به ترتیب برابر با ۴۵، ۶۳، ۸۴ و ۹۸ درصد مشاهده شد. در برخی تحقیقات پیشین بر روی سیستم MBBR نیز راندمان حذف آنیلین، فنول و هیدروکینون فاضلاب سنتزی با زمان ماند ۲۴ ساعت؛ مبین رفتار مشابه راکتورهای این تحقیق در حذف این گونه از آلاینده ها و ترکیبات نفتی است (دلنواز و همکاران، ۱۳۸۸؛ Ayati و همکاران، ۲۰۰۷).



شکل ۷- تغییرات راندمان حذف COD در COD های مختلف (درصد پرشدگی ۵۰ درصد)

بر اساس نتایج مطرح در شکل (۷)، می توان زمان ماند ۴۸ ساعت را به عنوان زمان ماند بهینه در راکتور برای تصفیه ۴- نیتروفنول انتخاب نمود.

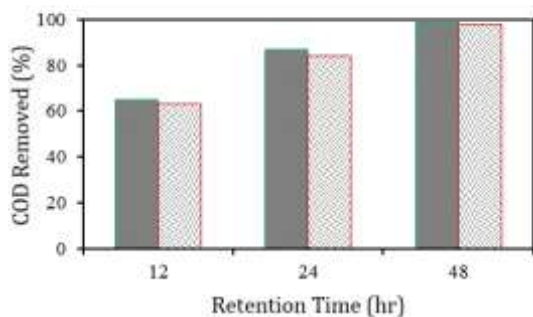
بیشتر از ۴۸ به ۷۲ ساعت است. به طوری که میانگین افزایش راندمان حذف COD در COD ورودی برابر با ۱۵۰۰ mg/L در درصدهای پرشدگی مختلف در راکتور، هنگام افزایش زمان ماند از ۲/۶ به ۴۸ ساعت برابر ۱۱/۳ درصد و از ۴۸ به ۷۲ ساعت برابر ۲/۶ درصد بود.

بر اساس شکل (۹)، در زمان ماندهای ۴۸ و ۷۲ ساعت، اختلاف چندانی بین درصد حذف COD وجود ندارد؛ مقدار این اختلاف در راکتور حاوی آکنه Bee Cell 2000 در تمامی درصدهای پر شدگی و در COD ورودی معادل ۱۵۰۰ mg/L برابر با ۲ درصد به دست آمد. نتایج حاصل علاوه بر تأیید این نکته که بهترین درصد پرشدگی راکتور برابر ۵۰ درصد است، بیانگر این نکته نیز هستند که مناسب‌ترین زمان ماند برای راکتور در تصفیه فاضلاب حاوی ۴- نیترو فنول برابر ۴۸ ساعت است.

۳-۹- بررسی اثر میکروارگانیسم‌های معلق بر راندمان راکتورهای تحقیق

با ملاحظه شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، راندمان حذف در زمان ماندهای مختلف راکتور تحقیق، قبل و بعد از تخلیه میکروارگانیسم‌های معلق راکتور با COD ورودی برابر با ۴۰۰ mg/L اختلاف ناچیزی دارد؛ که می‌توان نقش میکروارگانیسم‌های معلق را در راندمان حذف راکتورهای تحقیق ناچیز در نظر گرفت. به نحوی که در این بررسی، اختلاف راندمان حذف برای حالت با میکروارگانیسم معلق و بدون میکروارگانیسم معلق به ترتیب برای زمان ماندهای ۱۲، ۲۴، ۴۸ ساعت به میزان ۲، ۳ و ۱ درصد برای راکتور حاوی آکنه Bee Cell 2000 حاصل شد. نتیجه این بخش مبین تصفیه آلاینده تحقیق در راکتور مورد بررسی توسط میکروارگانیسم‌های چسبیده به حامل‌های بیوفیلمی می‌باشد.

■ MBBR With Suspended Microorganisms Bee Cell 2000
□ MBBR Without Suspended Microorganisms Bee Cell 2000

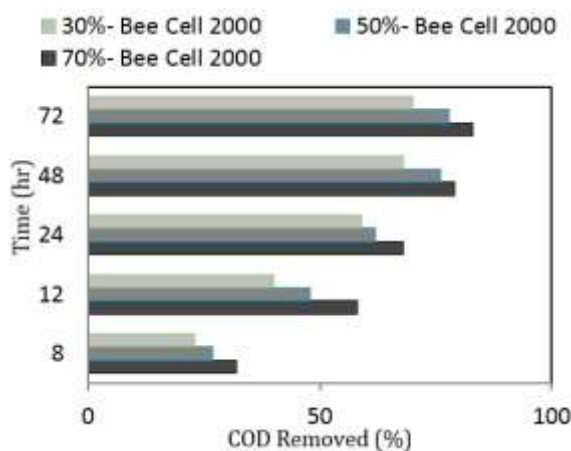


شکل ۱۰- اثر میکروارگانیسم‌های معلق بر راندمان حذف COD، قبل و بعد از تخلیه میکروارگانیسم پرشدگی ۵۰ درصد و COD = ۴۰۰ mg/L

۳-۸- بررسی اثر درصد پرشدگی آکنه‌ها بر راندمان راکتورها

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایشات بررسی تأثیر حجم پرشدگی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد راکتورهای تحقیق با آکنه بر راندمان حذف در COD معادل ۱۵۰۰ mg/L در شکل (۹) ارائه شده است. همانطور که در شکل (۹) نشان داده شده است، در درصد پرشدگی‌های ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد، میزان راندمان حذف پس از گذشت ۴۸ ساعت در COD معادل ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به- ترتیب برابر ۶۸، ۷۶، ۷۹ درصد حاصل شد.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، میزان پرشدگی ۳۰ درصد راکتور با آکنه، کمترین راندمان را داراست و راندمان با پرشدگی آکنه ۵۰ درصد را با کمی راندمان کمتر نسبت به درصد پرشدگی ۷۰ درصد، می‌توان حالت بهینه معرفی کرد. زیرا هم راندمان مناسبی دارد و هم مشکلات ناشی از عدم حرکت نامناسب آکنه (به علت تراکم بالا) را ندارد. بر اساس نتایج به دست آمده در هر دو راکتور، اگرچه کاهش حجم آکنه از ۷۰ به ۵۰ درصد با کاهش راندمان حذف همراه است ولی این کاهش قابل توجه نبوده و تأثیر چندانی در درصد حذف آلاینده ندارد.



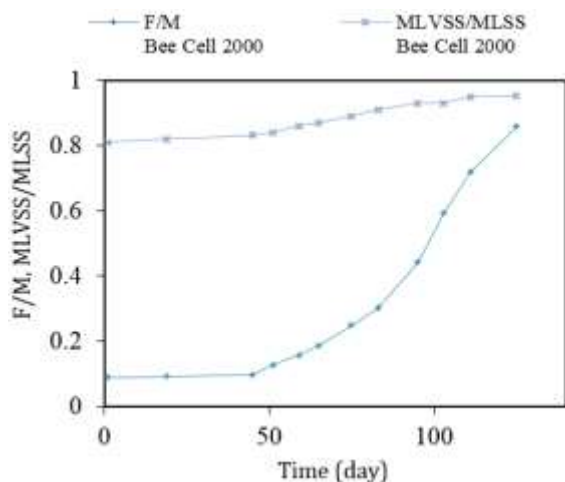
شکل ۹- راندمان راکتورهای مورد بررسی در این تحقیق در درصد پرشدگی‌های مختلف و زمان ماندهای مختلف (COD = ۱۵۰۰ mg/L)

در بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی سیستم MBBR نیز نسبت پرشدگی آکنه بین ۳۰ تا ۷۰ درصد بوده (Odegaard, ۲۰۰۶) و نتیجه مشابه این تحقیق ارائه شده است (دلنواز و همکاران، ۱۳۸۸؛ Ayati و همکاران، ۲۰۰۷؛ Hosseini و Borghei، ۲۰۰۵؛ Dong و همکاران، ۲۰۱۱؛ Van و Lubbe، ۲۰۰۷).

در شکل (۹) اثر زمان ماند نیز بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصل افزایش راندمان حذف آلاینده از ۲۴ به ۴۸ ساعت

۳-۱۱- بررسی پارامترهای کنترلی مؤثر در راه‌اندازی و راهبری بیوراکتورها

نتایج مربوط به بررسی پارامترهای نسبت غذا به میکروارگانیسم (F/M)، میزان MLSS و MLVSS، در مراحل سازگاری میکروارگانیسم‌ها و آزمایشات اصلی بیوراکتورها در شکل (۱۲) ارائه شده است.



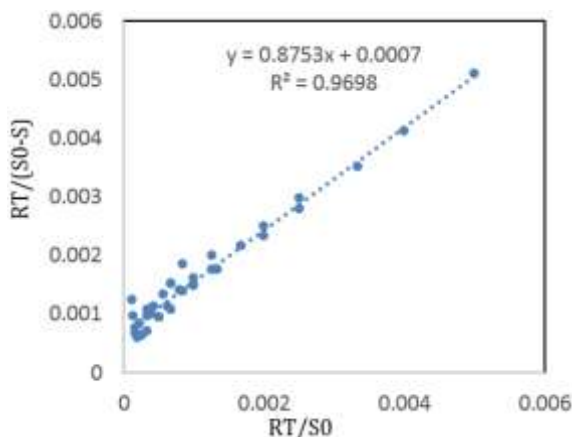
شکل ۱۲- نحوه تغییرات پارامترهای کنترلی مؤثر در راه‌اندازی و راهبری راکتورهای تحقیق

آلاینده ۴- نیتروفنول برای میکروارگانیسم‌ها سخت تجزیه-پذیر و سمی است و غلظت بالای این آلاینده مسمومیت و مرگ میکروارگانیسم‌ها را به همراه خواهد داشت. از طرفی هدف این تحقیق امکان تصفیه فاضلاب با غلظت‌های بالا توسط راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک است؛ لذا نسبت (F/M) برای راکتور حاوی آکنه Bee Cell 200 در دوره سازگاری و افزایش بار در محدوده $0.0007 - 0.0083 \text{ Kg COD. Kg}^{-1} \text{ MLSS. Day}^{-1}$ انتخاب گردید. به این ترتیب میکروارگانیسم‌ها در دوره سازگاری که (F/M) کم بود توسط آلاینده از بین نرفته و مجبور به مصرف آلاینده به‌عنوان منبع کربن شدند و در انتهای بهره‌برداری نیز توانایی راکتورها در حذف مقادیر (F/M) بالا در حد بیش از $0.008 \text{ KgCOD.Kg}^{-1} \text{ MLSS.Day}^{-1}$ مشخص گردید.

در شکل (۱۲) نتایج مربوط به نسبت MLVSS/MLSS در طول مدت سازگارسازی و آزمایشات اصلی برای راکتور ارائه شده است. بر اساس شکل (۱۲) برای راکتور حاوی آکنه Bee Cell 2000 مقدار MLVSS/MLSS در طول بهره‌برداری سازگارسازی و آزمایشات اصلی در بازه 0.0081 تا 0.0095 به‌دست آمد.

۳-۱۰- بررسی سینتیک واکنش‌های بیولوژیکی در راکتورهای تحقیق

در ادامه، سینتیک واکنش و تابعیت آن‌ها برای راکتور تحقیق با استفاده از مدل Stover-Kincannon مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن به ترتیب در شکل (۱۱) ارائه شده است.



شکل ۱۱- بررسی مدل Stover-Kincannon برای حذف آلاینده ۴- نیتروفنول در راکتور حاوی Bee Cell 2000

بر اساس شکل (۱۱)، مقدار ضریب همبستگی برای مدل اصلاح شده Stover-Kincannon در حذف آلاینده ۴- نیتروفنول در راکتور حاوی آکنه Bee Cell 2000 برابر 0.9698 حاصل شد. همچنین عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون به‌دست آمده به-ترتیب مقادیر U_{max} و K_B است که برابر با 0.0007 و 0.8753 حاصل شد.

بر اساس نتایج مشاهده شده سینتیک تجزیه بیولوژیکی حذف آلاینده ۴- نیتروفنول با مرتبه دوم سازگار است و به‌طور مشخص می‌توان مدل سینتیکی این تصفیه را برای راکتور بررسی شده در این تحقیق مدل اصلاح شده Stover-Kincannon دانست. پیروی مدل سینتیکی مذکور از سینتیک مرتبه دو برای هر دو راکتور این تحقیق نشان دهنده ترکیبات پیچیده‌ای است که در این تحقیق مورد تصفیه قرار گرفته است و توان قابل قبول میکروارگانیسم‌های سازگار شده برای تصفیه را نشان می‌دهد.

کاهش نرخ تصفیه با گذشت زمان یکی دیگر از نتایجی است که در واکنش‌های با مرتبه دو اتفاق می‌افتد و این مسئله به‌علت سخت تجزیه‌پذیر بودن ترکیباتی است که در اوایل فرآیند تجزیه نشده‌اند.

پارامترهای زمان ماند، غلظت آلاینده ورودی و درصد پرشدگی آلاینده بیشترین تأثیر را بر راندمان حذف داشته‌اند.

جدول ۷- جدول آنالیز واریانس نتایج روش سطح پاسخ

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	میانگین آماری F	P-value prob. > F
A- زمان ماند	۳۳۷۶/۱۳	۱	۳۳۷۶/۱۳	۸۳۳/۲۵	<۰/۰۰۰۱
B- بارگذاری آلی	۱۶۳۶/۵۴	۱	۱۶۳۶/۵۴	۴۰۳/۹۱	<۰/۰۰۰۱
C- درصد پرشدگی مدیا	۲۲۳/۳۳	۱	۲۲۳/۳۳	۵۵/۱۲	<۰/۰۰۰۱
AB	۸۴/۵۰	۱	۸۴/۵۰	۲۰/۸۶	۰/۰۰۱۰
AC	۲۴/۵۰	۱	۲۴/۵۰	۶/۰۵	۰/۰۳۳۷
BC	۰/۷۳۲۷	۰/۱۲	۰/۵۰	۱	۰/۵۰
A2	۰/۰۰۰۲	۳۱/۴۶	۱۲۷/۴۵	۱	۱۲۷/۴۵
B2	۳۰/۱۱	۱	۳۰/۱۱	۷/۴۳	۰/۰۲۱۳
C2	۰/۰۱۴	۱	۰/۰۱۴	۰/۰۰۳	۰/۹۵۴۱
باقی مانده	۴۰/۵۲	۱۰	۴/۰۵		
عدم تناسب	۴۰/۵۲	۵	۸/۱۰		
خطای خالص	۰/۰۰۰	۵	۰/۰۰۰		
مجموع	۵۵۵۸/۸۰	۱۹			

۴- نتیجه گیری

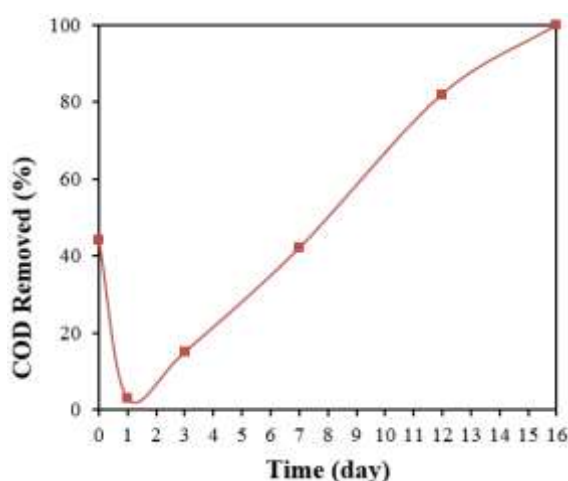
در خصوص رفتار سیستم‌های MBBR در طی افزایش بارگذاری در مرحله سازگارسازی، می‌توان نتیجه گرفت در هر مرحله از افزایش بار، پس از تکرار بارگذاری در بارگذاری‌های مراحل انتهایی، تغییرات ناچیزی در حذف ۴- نیتروفنول و COD مشاهده شد. علت وقوع این رفتار را می‌توان به سازگاری بیشتر میکروارگانیسم‌ها با آلاینده نسبت داد.

- برای بررسی اثر زمان ماند، نمونه‌برداری‌هایی در زمان ماندهای ۸، ۱۲ و ۲۴ و ۴۸ ساعت صورت گرفت. نتایج حاصل نشان داد که افزایش زمان ماند سبب افزایش راندمان حذف ۴- نیتروفنول و COD می‌گردد. مثلاً در COD معادل ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در راکتور حاوی Bee Cell 2000 در زمان ماندهای ۸ و ۱۲ و ۲۴ و ۴۸ راندمان حذف COD به ترتیب برابر ۳۵ و ۵۳ و ۶۸ و ۸۶ بود.

- جهت بررسی تأثیر کاهش درصد پرشدگی آکنه، طی دو مرحله درصد پرشدگی آکنه از ۷۰ درصد به ۵۰ درصد و از ۵۰ درصد به ۳۰ درصد در راکتورها کاهش داده شد. نتایج مربوط به راندمان حذف COD نشان داد که با کاهش درصد پرشدگی از ۷۰ به ۵۰ درصد کاهش راندمان حذف کمتر از حالتی است که درصد پرشدگی از ۵۰ به ۳۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. دلیل وقوع این نتیجه را بر اساس مشاهدات عینی می‌توان به این موضوع نسبت داد که در درصد پرشدگی ۷۰ درصد، تعداد آکنه‌ها به مراتب بیشتر بود، به طوری که برخی از آکنه‌ها در راکتور ساکن بوده و مابقی

۳-۱۲- بررسی اثر شوک وارده بر راندمان بیوراکتورهای تحقیقی

به منظور بررسی اثر شوک بار آلی بر کارایی بیوراکتور تحقیقی، مقدار COD ورودی به راکتور پس از رسیدن به راندمان کمتر از ۵۰ درصد در آزمایشات اصلی، به اندازه ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش داده شد به طوری که در راکتور حاوی آکنه Bee Cell 2000، خوراک ورودی از COD معادل ۳۰۰۰ mg/L به ۵۰۰۰ mg/L افزایش داده شد. نتایج آزمایشات مربوط به بررسی اثر شوک وارده بر راکتور حاوی آکنه Bee Cell 2000 در شکل (۱۳) ارائه شده است.



شکل ۱۳- راندمان حذف آلاینده در راکتور حاوی آکنه Bee Cell 2000 پس از اعمال شوک (درصد پرشدگی ۵۰ درصد، COD ورودی برابر با ۵۰۰۰ mg/L)

در این راکتور اعمال شوک، در ابتدا راندمان را به شدت کاهش داد و کاهش شدید راندمان، حذف تا ۳ درصد در زمان ماند ۲۴ ساعت پس از بارگذاری آلاینده را باعث مشاهده شد. نتایج حاصل نشان داد که کاهش راندمان ناشی از شوک با افزایش زمان ماند بهبود می‌یابد به نحوی که راندمان پس از ۱۲ روز به ۸۲ درصد رسید و سیستم پس از ۱۶ روز آلاینده را به طور کامل تصفیه کرد. با توجه به افزایش زمان ماند از ۲ روز به ۱۶ روز راکتور توانست اثر افزایش غلظت را تعدیل نماید و از حالت شوک خارج گردد. این راکتور نیز در طی ۸ روز به راندمان قبل از شوک برگشت.

۳-۱۳- نتایج کاربرد روش سطح پاسخ در تحلیل نتایج آزمایش‌های طراحی شده

تحلیل واریانس روشی است که طبق آن تغییرات یا پراکندگی در مجموعه‌ای از داده‌ها به مولفه‌های مختلف تقسیم می‌شوند. تحلیل واریانس نتایج مربوط به آزمایش‌های روش سطح پاسخ در جدول (۷) ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل به ترتیب

- Cunha GDC, Silva IAA, Alves JR, Oliveira RVM, Menezes THS, Romão LP, "Magnetic hybrids synthesized from agroindustrial byproducts for highly efficient removal of total chromium from tannery effluent and catalytic reduction of 4-nitrophenol", *Cellulose*, 2018, 25 (12), 7409-7422. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2046-2>.
- Dong Z, Lu M, Huang W, Xu X, "Treatment of oilfield wastewater in moving bed biofilm reactors using a novel suspended ceramic biocarrier", *Journal of hazardous materials*, 2011, 196, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.09.001>.
- Delnavaz M, Ayati B, Ganjidoust H, "Biodegradation of aromatic amine compounds using moving bed biofilm reactors", *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2008, 5(4), 243-250.
- Ding Q, Kang Z, Cao L, Lin M, Lin H, Yang DP, "Conversion of waste eggshell into difunctional Au/CaCO₃ nanocomposite for 4-Nitrophenol electrochemical detection and catalytic reduction", *Applied Surface Science*, 2020, 510, 145526. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145526>.
- Din MI, Khalid R, Hussain Z, Hussain T, Mujahid A, Najeeb J, Izhar F, "Nanocatalytic assemblies for catalytic reduction of nitrophenols: a critical review", *Critical reviews in analytical chemistry*, 2020, 50 (4), 322-338. <https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1637241>.
- Ebrahimi Ghadi M, Qaderi F, Babanezhad E, "Prediction of mortality resulted from NO₂ concentration in Tehran by Air Q+ software and artificial neural network", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16 (3), 1351-1368, <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1818-4>.
- Greenberg AE, Clescerl LS, Eaton AD, "Standard methods for the examination of water and wastewater", 20th Edition, American Public Health, Washington, 2000.
- Ghaderi M, Tamadoni A, Mahdizadeh A, "introducing an applied reactor for treatment of wastewater containing propylene glycol", *SN Applied Sciences*, 2019, 1 (12), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1638-2>.
- Gzar HA, Al-Rekabi WS, Shuhaieb ZK, "Applicaion of Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) for Treatment of Industrial Wastewater: A Mini-Review", *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1973 (1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012024>.
- Gao XY, Liu RL, Ma J, Zhan HY, Zhang ZQ, "Combined dual-metal templates for fabrication of magnetic hierarchical porous carbon for highly efficient removal of 4-nitrophenol", *Journal of Porous Materials*, 2016, 23 (1), 157-164. <https://doi.org/10.1007/s10934-015-0066-y>.
- Grau P, Dohanyos M, Chudoba J, "Kinetics of multicomponent substrate removal by activated sludge", *Water Research*, 1975, 9 (7), 637-642. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(75\)90169-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(75)90169-4).
- Ghaderi M, Asadi P, Kouhrostamkolaei M, "Applying response surface methodology on the results of serial sequencing batch moving bed reactor", *SN*

آکنه‌ها هم از تحرک کمتری نسبت به آکنه‌ها در نسبت پرشدگی ۵۰ درصد برخوردار بودند. لذا با کاهش نسبت پرشدگی از ۷۰ به ۵۰ درصد، در عمل آکنه‌های ساکن از راکتور خارج شده و فضای بیشتری از راکتور در اختیار آکنه‌های باقی‌مانده جهت گردش قرار گرفت. اما با کاهش نسبت پرشدگی از ۵۰ به ۳۰ درصد، علی‌رغم بهتر شدن وضعیت تحرک آکنه‌ها، در واقع بخشی از آکنه‌های متحرک نیز از راکتور خارج شده و لذا این تغییر منجر به کاهش راندمان حذف آلاینده گردید. لذا درصد پرشدگی بهینه با توجه به مطالب ذکر شده برای راکتور ۵۰ درصد می باشد.

- نتایج آزمایشات مربوط به بررسی اثر میکروارگانسیم‌های معلق در سیستم‌های MBBR با COD اولیه معادل ۱۰۰۰ mg/L بیانگر کم اثر بودن میکروارگانسیم‌های معلق می‌باشد.
- بر اساس مطالعات سینتیکی انجام شده، مدل اصلاح شده Stover-Kincannon بهترین مدل برای راکتور بود.
- بررسی‌ها و نتایج مربوط به آزمایشات شوک‌پذیری راکتورها نشان داد، راکتور توانایی قابل قبولی در مقاومت در برابر شوک آلی دارد.

۵- مراجع

- آیتی ب، گنجی دوست ح، دنواز م، "کاربرد راکتورهای بیوفیلیمی با بستر متحرک (MBBR) در تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی"، مرکز نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۹.
- حائری ح، پژوم شریعتی ف، قادری ف، "استفاده از راکتور بیولوژیکی MBBR حاوی مدیای Kaldness در تصفیه نفتاب"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۴۰۰، ۵۱ (۲)، ۴۱-۴۹. <https://doi.org/10.22034/jcee.2020.25824.1621>
- دنواز م، آیتی ب، گنجی دوست ح، "سینتیک واکنش تصفیه فاضلاب حاوی آنیلین در راکتور بیوفیلیمی با بستر متحرک"، *مجله سلامت و محیط*، ۱۳۸۸، ۲ (۱)، ۷۶-۸۷.
- Ayati B, Ganjidoust H, Fattah MM, "Degradation of aromatic compounds using moving bed biofilm reactors", *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2007, 4 (2), 107-112.
- Abdelhamid HN, "High performance and ultrafast reduction of 4-nitrophenol using metal-organic frameworks", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9 (1), 104404. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104404>.
- Barreca S, Colmenares JIV, Pace A, Orecchio S, Pulgarin C, "Neutral solar photo-Fenton degradation of 4-nitrophenol on iron-enriched hybrid montmorillonite-alginate beads (Fe-MABs)", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2014, 282, 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2014.02.008>.

- 4-nitrophenol at room temperature", *Surfaces and Interfaces*, 2018, 13, 205-215. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.08.006>.
- Tamadoni A, Qaderi F, Optimization of soil remediation by ozonation for PAHs contaminated soils, *Ozone: Science & Engineering*, 2019, 41 (5), 454-472, <https://doi.org/10.1080/01919512.2019.1615865>.
- Teimouri M, Khosravi-Nejad F, Attar F, Saboury AA, Kostova I, Benelli G, Falahati M, "Gold nanoparticles fabrication by plant extracts: synthesis, characterization, degradation of 4-nitrophenol from industrial wastewater, and insecticidal activity—a review", *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184, 740-753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.268>.
- Van Haandel A, Van Der Lubbe J, "Handbook biological waste water treatment-design and optimisation of activated sludge systems", *Webshop Wastewater Handbook*, 2007.
- Yavari SM, Qaderi F, "Determination of thermal pollution of water resources caused by Neka power plant through processing satellite imagery", *Environment, Development and Sustainability*, 2020, 22 (3), 1953-1975. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0272-2>.
- Zhao R, Li Y, Ji J, Wang Q, Li G, Wu T, Zhang B, "Efficient removal of phenol and p-nitrophenol using nitrogen-doped reduced graphene oxide", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 611, 125866. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125866>.
- Applied Sciences, 2020, 2 (1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1894-1>.
- Gu S, Wunder S, Lu Y, Ballauff M, Fenger R, Rademann K, Zaccone A, "Kinetic analysis of the catalytic reduction of 4-nitrophenol by metallic nanoparticles", *The Journal of Physical Chemistry C*, 2014, 118 (32), 18618-18625. <https://doi.org/10.1021/jp5060606>.
- Hosseini SH, Borghei SM, "The treatment of phenolic wastewater using a moving bed bio-reactor", *Process biochemistry*, 2005, 40 (3-4), 1027-1031. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.05.002>.
- Iben Ayad A, Luat D, Ould Dris A, Guénin E, "Kinetic analysis of 4-nitrophenol reduction by water-soluble palladium nanoparticles", *Nanomaterials*, 2020, 10 (6), 1169. <https://doi.org/10.3390/nano10061169>.
- Khalegh R, Qaderi F, Optimization of the effect of nanoparticle morphologies on the cost of dye wastewater treatment via ultrasonic/photocatalytic hybrid process; *Applied Nanoscience*, 2019, 9, 1869-1889. <https://doi.org/10.1007/s13204-019-00984-9>.
- Kincannon DF, Stover EL, "Design methodology for fixed film reactors-RBC's and biological towers", *Civil Engineering for Practicing and Design Engineers*, 1982, 2, 107-124.
- Kamal T, Asiri AM, Ali N, "Catalytic reduction of 4-nitrophenol and methylene blue pollutants in water by copper and nickel nanoparticles decorated polymer sponges", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, 261, 120019. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120019>.
- Levin L, Carabajal M, Hofrichter M, Ullrich R, "Degradation of 4-nitrophenol by the white-rot polypore *Trametes versicolor*", *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, 107, 174-179. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.11.023>.
- Minz S, Garg S, Gupta R, "Effect of Operating Parameters, Reaction Kinetics and Comparative Assessment of Fluidized-Bed Fenton Oxidation of 4-Nitrophenol", *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, 2021, 40 (2), 539-550. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2020.40534>.
- Ma YS, Huang ST, Lin JG, "Degradation of 4-nitrophenol using the Fenton process", *Water science and technology*, 2000, 42 (3-4), 155-160. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0373>.
- Odegaard H, "Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process", *Water science and technology*, 2006, 53 (9), 17-33. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.284>.
- Shah L, Ali HSM, Bello BA, Khan SA, Anwar Y, Khan MS J, Khan SB, "Catalytic performance of the biosynthesized AgNps from *Bistorta amplexicaule*: antifungal, bactericidal, and reduction of carcinogenic 4-nitrophenol", *Green Processing and Synthesis*, 2020, 9 (1), 259-267. <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0027>.
- Sajadi SM, Kolo K, Abdullah SM, Hamad SM, Khalid HS, Yassein AT, "Green synthesis of highly recyclable CuO/eggshell nanocomposite to efficient removal of aromatic containing compounds and reduction of



EXTENDED ABSTRACT

Removal of 4-Nitrophenol Contaminant by Moving Bed Biofilm Reactor with Media Bee Cell 2000 and Shock Study

Mahdi Ghaderi^a, Ali Attarzadeh^{b,*}

^a Department of Civil Engineering; Faculty of Engineering, Qom University of Technology (QUT), Qom, Iran

^b Department of Civil Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

Received: 06 June 2022; **Review:** 24 August 2022; **Accepted:** 11 September 2022

Keywords:

Oil pollutants, 4- Nitrophenol, Media, Moving Bed Biofilm Reactor, Shock Study.

1. Introduction

Today, the population of most countries is growing exponentially. Countries whose main economic dependence is on oil production. This issue, along with the lack of a rational management system for increasing fuel consumption, groundwater resources and it has seriously threatened the environment in industrial hubs (Ghaderi et al., 2019). Of the various compounds of water pollutants that enter water sources mainly through raw wastewater and its effluents, phenolic compounds are of special importance and can even enter water sources naturally (Ghaderi et al., 2019; Ghaderi et al., 2020).

Nitrophenol, a member of the phenolic family of pollutants, is a carcinogen and is known for its many adverse effects on humans and aquatic animals. In recent decades, chemical reduction of nitro phenolic compounds has been widely reported as an advanced removal method for such hazardous dyes from reservoirs (Din et al., 2020).

Nitrophenols, which are toxic, inhibitory, and biodegradable organic compounds, are widely used in the chemical industry to make pesticides, dyes, and drugs, and are often found in the effluents of industrial wastewater treatment plants. (Ma et al., 2000).

2. Methodology

In the first place, it was piloted on a laboratory scale and then the sludge from the return line obtained from the municipal wastewater treatment plant was applied to the pollutant. Thus, at first, all the initial feed was in the form of glucose, and gradually the amount of glucose was reduced and the 4-nitrophenol contaminant was replaced. After adaptation, the removal of 4-nitrophenol contaminant by the reactor was investigated.

2.1. Pilot profile

The specifications of the pilot used are given in Table (1).

2.2. Media profile

Bee cell 2000 media was used to start the reactor with a moving bed. Table (2) presents the characteristics of the media used.

* Corresponding Author

E-mail addresses: attarzadeh@qut.ac.ir (Ali Attarzadeh), ghaderi.m@qut.ac.ir (Mahdi Ghaderi).

Table 1. Reactor specifications used in the research

Plexiglas	Reactor material
5	Wall thickness (mm)
21	Inner diameter (cm)
22	Outer diameter (cm)
61	Effective height (cm)
90	Total height (cm)
31.156	Total volume (lit)
21.117	Effective volume (lit)

Table 2. Characteristics of acne used in research

Bee cell 2000	Parameter
Polystyrene	Media type
Honeycomb	Shape
950	Density (kg/m ³)
White	Color
650	Specific area for biofilm growth (m ² /m ³)

2.3. Equipment

The main devices used were as follows:

- Spectrophotometer for measuring COD and concentration
- 4-Nitrophenol
- Digital scale with an accuracy of 0.001 g
- pH meter
- Furnace
- Avon to determine MLSS
- Aeration pumps (used in home aquariums)

2.4. Setting up the MBBR system

In order to launch the pilot, about one third of the bioreactor volume was filled with concentrated sludge prepared from the backflow of the activated sludge basin of the municipal wastewater treatment plant; the rest of the volume of the bioreactor was made up to 300 mg/L with a solution of water and glucose with COD. Also, after starting the bioreactor, a series of experiments were performed, the results of which are shown in Table (3).

Table 3. Specifications of sludge used to start the reactor

value	Parameter
7.2	pH
19	Temperature (°C)
1.4	Soluble oxygen (mg/L)
4112	Suspended liquid suspended solids (mg/L)
3331	Suspended volatile solids mixed liquid (mg/L)

2.5. Adaptation of microorganisms to synthetic wastewater

In the first stage, glucose compatibility with COD equivalent to 300 mg/l was injected into the system. Then, in order to adapt the sludge to the synthetic wastewater, in eleven stages, wastewater containing different concentrations of 4-nitrophenol contaminant was injected, so that in the second stage, COD equivalent to 300 mg/l was injected into the system; In the first loading of pollutants into the reactor, the share of organic pollutants and glucose was selected as 10% and 90%, respectively. Furthermore, the ratio of organic charge of 4-nitrophenol to glucose is 20+80, 70+30, 60+40, 50+50, 40+60, 30+70, 20+80, 10+90 and 100+0, respectively. Percentage was injected into the system (Fig. 1) and the COD removal efficiency at the end of the residence time (24 hours) at each stage was evaluated.

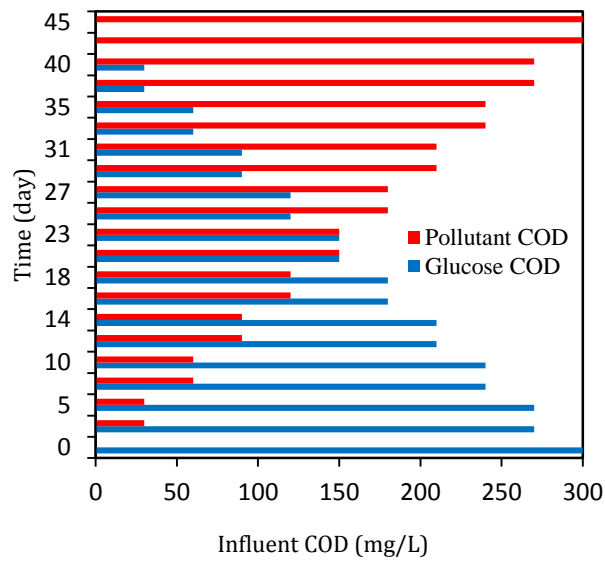


Fig. 1. Loading process in the compatibility stage (COD=300 mg/l)

2.6. Parameters examined in the main tests

At the end of the adaptation period, the main tests were performed and in this period the effect of the input COD level at the levels of 400, 500, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 2500 and 3000 mg/l (at levels 8, 12, 24 And 48 hours) were studied and also the effect of reactor filling percentage (at three levels of 30, 50 and 70%) on the input COD equal to 1500 mg/l was investigated.

2.7. Evaluation of contaminant removal efficiency in case of input shock to the system

In this study, we investigated the effect of using acne on the shock rate of Bee Cell 2000 biological system of acne by increasing 2000 mg/l in the amount of COD entering the reactors (when the reactors reached less than 50% efficiency in the main tests). And how to return it to the previous condition was studied.

3. Results and discussion

3.1. Effect of increasing input load on COD removal efficiency

In the initial loading up to COD equal to 1000 mg/L, the removal efficiency in the reactor has a uniform decreasing trend, so that in COD equal to 600 mg/L this efficiency is equal to 77% in 24 hours, also in COD equal to 800 mg/L this Efficiency in 24 hours is equal to 71%. In COD equal to 1000 mg/L, the removal efficiency was observed to be equal to 68% at a residence time of 24 hours and these values were reduced by 6% for a COD equal to 1500 mg/L for a residence time of 24 hours compared to the input COD of 1000 mg/l. had. The highest removal efficiency is related to the input COD equivalent to 400 mg/L in the reactor containing the studied acne.

3.2. Investigation of the effect of different residual time on the removal efficiency of 4-nitrophenol

The removal efficiency of 4-nitrophenol during the operation period is shown in Fig. 2. Carefully in the diagram of a decreasing trend in the removal efficiency of the concentration of 4-nitrophenols input applied to the reactors studied in the study was observed, so that by increasing the concentration of 4-nitrophenol input from 252 to 1610 mg/l in the remaining time of 24 And 48 hours of pollutant removal efficiency decreased by 43% and 40%, respectively.

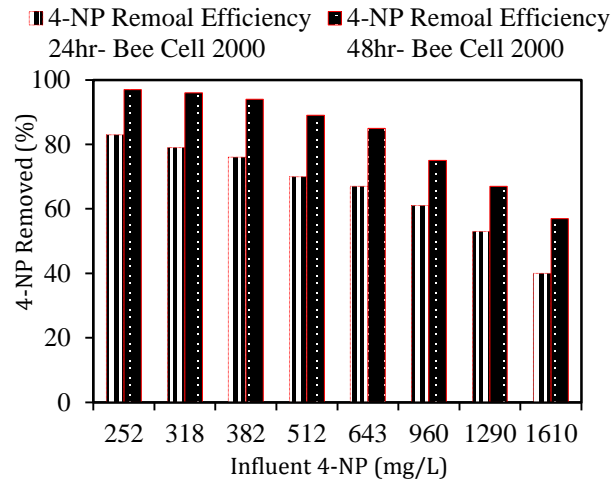


Fig. 2. Changes in removal efficiency of 4-nitrophenol during retention time and different concentrations of 4-nitrophenol input (50% filling percentage)

3.3. Investigation of the effect of shock on the efficiency of research bioreactors

In order to investigate the effect of organic charge shock on the efficiency of the research bioreactor, the amount of COD input to the reactor was increased by 2000 mg/l after reaching an efficiency of less than 50% in the main tests, so that in the reactor containing acne Bee Cell 2000, The input feed was increased from COD equivalent to 3000 mg/L to 5000 mg/L. The results of experiments investigating the effect of shock on the reactor containing Bee Cell 2000 acne are presented in Fig. 3. In this reactor, shock was initially severely reduced, and a sharp decrease in efficiency was observed, removing up to 3% during the 24h after the contaminant loading.

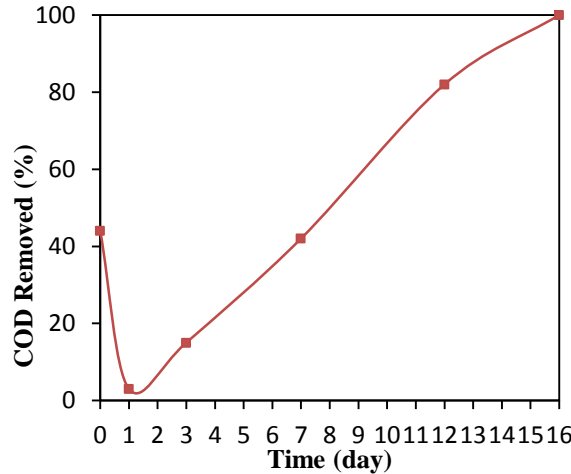


Fig. 3. Contaminant removal efficiency in a reactor containing Bee Cell 2000 media after shock (50% filling percentage, input COD equal to 5000 mg/L)

4. Conclusions

Regarding the behavior of MBBR systems during increasing load in the adaptation stage, it can be concluded that at each stage of increasing the load, after repeated loading in the final stage loads, slight changes in the removal of 4-nitrophenol and COD were observed. The cause of this behavior can be attributed to the greater compatibility of microorganisms with pollutants.

To evaluate the effect of time, sampling was performed at 8, 12, 24 and 48 hours. The results showed that increasing the retention time increased the removal efficiency.

4-nitrophenol and COD. For example, in a COD of 1000 mg/L, in a reactor containing Bee Cell 2000, the COD removal efficiencies of 35, 53, 68, and 86 were 8, 12, 24, and 48, respectively.

To investigate the effect of reducing the percentage of media filling, the percentage of media filling was reduced from 70% to 50% and from 50% to 30% in two stages. The results related to COD removal efficiency

showed that by reducing the filling percentage from 70 to 50%, the removal efficiency is less than in the case where the filling percentage decreases from 50 to 30%. The reason for this result can be attributed to the fact that at 70% fullness, the number of media was much higher, so that some media were stationary in the reactor and the rest of the media were less mobile than the media. They had 50% filling. Therefore, by reducing the filling ratio from 70 to 50%, in practice, the static media left the reactor and more space of the reactor was provided to the remaining media for circulation. However, by reducing the filling ratio from 50 to 30%, despite the improvement of media mobility, in fact, part of the moving media was removed from the reactor, and therefore this change led to a reduction in pollutant removal efficiency. Therefore, the optimal filling percentage according to the mentioned contents for the reactor is 50%.

The results of experiments on the effect of suspended microorganisms in MBBR systems with an initial COD of 1000 mg/L indicate the ineffectiveness of suspended microorganisms.

Based on the kinetic studies performed, the modified Stover-Kincannon model was the best model for the reactor.

Studies and results of reactor shock tests have shown that the reactor has an acceptable ability to withstand organic shock.

5. References

- Din MI, Khalid R, Hussain Z, Hussain T, Mujahid A, Najeeb J, Izhar F, "Nanocatalytic assemblies for catalytic reduction of nitrophenols: a critical review", *Critical reviews in Analytical Chemistry*, 2020, 50 (4), 322-338. <https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1637241>.
- Ghaderi M, Tamadoni A, Mahdizadeh A, "introducing an applied reactor for treatment of wastewater containing propylene glycol", *SN Applied Sciences*, 2019, 1 (12), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1638-2>.
- Ghaderi M, Asadi P, Kouhirostamkolaei M, "Applying response surface methodology on the results of serial sequencing batch moving bed reactor", *SN Applied Sciences*, 2020, 2 (1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1894-1>.
- Ma YS, Huang ST, Lin JG, "Degradation of 4-nitrophenol using the Fenton process", *Water Science and Technology*, 2000, 42 (3-4), 155-160. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0373>.