بررسی فرایند ترکیبی بی‌هوازی- هوازی (AO) در تصفیه فاضلاب صنایع فلزی با هدف کاهش COD و BOD_5

امید محمدی[1*]، منوچهر حیدرپور[2] و صابر جمالی[3]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۱۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۲۱)

چکیده

کاهش منابع آب و سرانه تجدیدپذیر در ۳۰ سال اخیر، ایران را در آستانه بحران آب قرار داده است. استفاده مجدد از پساب از راهکارهای مبارزه با کم‌آبی و جلوگیری از تخلیه به محیط زیست است. هدف از این پژوهش کاهش COD و BOD_5 با استفاده از فرایند ترکیبی AO در تصفیه فاضلاب صنعتی حاصل از صنایع فلزی است. از اهداف دیگر پژوهش، کاهش زمان ماند هیدرولیکی با در نظر گرفتن کارایی حذف مطلوب مواد آلی است. در این پژوهش یک پایلوت بیولوژیکی بی‌هوازی- هوازی (AO) با بستر لجن استفاده شده است که تحت رژیم تغذیه پیوسته قرار گرفته و بررسی‌ها روی BOD_5 و COD انجام گرفته است. پایلوت در زمان ماندهای مختلف و هوادهی بین ۵ تا ۱۵ ساعت، مطالعه شد. بر اساس آنالیز آماری روی راندمان حذف COD در زمان ماندهای مختلف، زمان ماند ۲۴ ساعت به‌عنوان زمان ماند هیدرولیکی مطلوب برای کارایی حذف انتخاب شد. راندمان‌های به‌دست آمده برای این زمان ماند تقریباً برابر تصفیه‌خانه‌های مشابه با زمان ماندهای بیشتر از ۴۸ ساعت بود. درنتیجه می‌توان گفت زمان ماند هیدرولیکی ۲۴ ساعت به‌عنوان زمان ماند بهینه می‌تواند BOD_5 و COD را به‌میزان قابل قبول کاهش دهد. نتایج حاصل، میانگین حذف ۶۳/۸۶ درصدی BOD_5 در فاز بی‌هوازی و ۸۳/۹۹ درصدی در فاز هوادهی را نشان داد. کارایی حذف برای COD به‌ترتیب در قسمت‌های بی‌هوازی و هوازی ۷۶/۵ و ۷۴/۳۵ درصد بوده است و در کل پایلوت میانگین حذف BOD_5 و COD به‌ترتیب ۹۵/۲۴ و ۹۴/۸۰ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آب نامتعارف، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، اکسیژن‌خواهی شیمیایی، تصفیه بیولوژیکی بی‌هوازی، زمان ماند هیدرولیکی

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: o.mohammadi333@gmail.com

مقدمه

یکی از لازمه‌های حفظ کیفیت محیط زیست و رشد و توسعه در حوزه‌های اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و فرهنگی داشتن منابع آب با کیفیت (سالم) است. رشد سریع صنایع کشور که عموماً بدون توجه به کفایت منابع آب صورت می‌پذیرد، مشکلات عدیده‌ای را در تخصیص آب کافی به نقاط مختلف مصرف ایجاد کرده و فشار بیشتری بر منابع آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های کشور وارد کرده است. بخش صنعت در کشور نقش عمده‌ای در آلودگی ذخایر آب شیرین دارد. از طرفی این بخش به‌عنوان یکی از مصرف کنندگان عمده آب در کشور با مصرف بیش از یک میلیارد متر مکعب به‌حساب می‌آید (۲ و ۳). فرایندهای بیولوژیکی یکی از روش‌های متداول و به صرفه در تصفیه فاضلاب است. هدف عمده از تصفیه بیولوژیکی، استفاده از میکروارگانیسم‌ها برای تبدیل مواد آلی به محصولات دیگر و حذف یا کاهش مواد مغذی و سایر آلاینده‌هاست. سیستم‌های بیولوژیکی از نظر محیط بیوشیمیایی به سه دسته اصلی هوازی، بی‌هوازی و ترکیبی (بی‌هوازی و هوازی) و از لحاظ نوع رشد به سه گروه معلق، چسبیده و ترکیبی تقسیم می‌شوند. فرایند(Anaerobic- Oxic) AO یک روش تصفیه ترکیبی است. در این روش دو فرایند هوازی و بی‌هوازی به‌صورت متوالی صورت می‌گیرند. استفاده از روش هوازی در تصفیه پساب همراه با مشکلاتی مانند افزایش حجم لجن، عدم امکان استفاده در مقادیر زیاد COD (Chemical Oxygen Demand) و BOD_5 (Biological Oxygen Demand) و همچنین هزینه زیاد انجام فرایند است. همچنین باکتری‌های بی‌هوازی توانایی بیشتری در هضم مواد آلی دارند و میزان لجن تولیدی نسبت به هوازی کمتر است. در عین حال وجود مواد بازدارنده در حین فرایند از جمله مواد فنولی درسیستم، سبب کاهش سرعت فرایند می‌شود و این خود یکی از مشکلات فرایند بی‌هوازی است (۲ و ۵). یکی دیگر از مشکلات روش بی‌هوازی، عدم کاهش رنگ پساب است. درحالی که با تلفیق این دو روش (AO) می‌توان میزان COD و رنگ پساب را تا حدود زیادی کاهش داد. به این صورت که ابتدا توسط روش بی‌هوازی ترکیبات فنولی، قسمتی از COD و رنگ پساب حذف می شود و در مرحله دوم با استفاده از روش هوازی باقی‌مانده COD پساب، تصفیه می‌شود (۷). کالیوژنی و همکاران با راه‌اندازی یک بستر بیهوازی لجن با جریان رو به بالا (UASB = Upflow Anaerobic Sludge Blanket) به تصفیه پساب خمیرمایه رقیق شده پرداختند. این روش بیولوژیکی نتوانست بیشتر از ۷۴ درصد COD موجود در پساب را حذف کند که این مقدار از استانداردهای مجاز برای تخلیه پساب به محیط زیست دور بود. از این‌رو، آنها برای حذف آمونیاک و مواد آلی باقیمانده از یک بیوفیلتر بی‌هوازی- هوازی استفاده کردند، اما باز هم پارامترهای کیفی پساب به مقدار مطلوب نرسید (۱۱). از جمله پارامترهایی که باید برای ارزیابی عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب توجه شود، میزان اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (BOD_5)، میزان اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، مواد معلق، جامدات محلول و pH فاضلاب خروجی و TSS از این تصفیه‌خانه‌هاست (۱۵).

مطالعه‌ای دیگر توسط موسوی به‌منظور بررسی شاخص‌های عملکردی بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهر اصفهان صورت گرفت. نسبت BOD_5 و COD به فسفر در اغلب تصفیه‌خانه‌ها بالاتر از حد نرمال و دلیل آن ورود مواد شوینده زیاد به همراه فاضلاب بود. توجه به حذف فسفر به‌ویژه در مناطقی که پساب به رودخانه تخلیه می‌شود، ضروری است (۱۶). دولک‌گورگن و همکاران در سیستم روش رآکتور متوالی منقطع (SBR = Sequencing Batch Reactors) شاخص حجمی لجن را کمتر از ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش کردند. در این حالت درصد حذف کربن، نیتروژن و فسفر به‌ترتیب ۹۵، ۷۱و ۹۹/۶ درصد بود. نتایج حاصل نشان داد که با کاهش مقدار SVI (شاخص حجم لجن Sludge volume index) ساختار توده‌های لجن فعال از اجزاء جدا از هم به حالت گرانوله تبدیل می‌شود. بنابراین حداقل مقدار SVI در نسبت COD بر نیتروژن و زمان هوادهی بالا موجب

گرانول‌سازی می‌شود (۸).

در تحقیقی، شهمرادی و همکاران نشان دادند که غلظت COD و BOD_5 در خروجی تصفیه‌خانه کاهش یافته است. ایشان نتیجه گرفتند که تصفیه‌خانه فاضلاب شهر بجنورد به‌دلیل شرایط مناسب جوی و طراحی، درصد حذف مواد آلی نوترینت‌های آن مناسب بوده که موجب کاهش چشمگیر آلودگی شده است و راندمان کافی برای برآوردن استانداردهای خروجی پساب فراهم می‌آورد (۱۸). در تحقیقی، نصری با استفاده از یک پایلوت AAO (Anaerobic- Anoxic- Oxic) راندمان حذف مواد آلی روی فاضلاب صنایع فلزی را بررسی کرد. در این پژوهش که پنج ماه به طول انجامید، با زمان ماند هیدرولیکی ۳۰ ساعت درصد حذف COD، BOD_5، فسفات و نیتروژن به‌ترتیب ۹۴/۶۶، ۹۲/۸۰، ۹۰/۰۷ و ۸۲/۱۵ درصد به دست آمد (۱۷). در پژوهشی دیگر به‌منظور بررسی اثر تغییرات زمان ماند بر حذف فسفر، BOD_5، COD، TSS و تغییرات میزان برگشت مایع مخلوط بر حذف فسفر در فاضلاب صنعتی نتایج نشان داد، زمان ماند هوادهی بهینه در زمان ۲۰ ساعت حاصل شده است، به‌طوری که در این زمان، راندمان حذف COD به میزان ۳۶/۹۹ درصد، BOD_5 به‌میزان ۹۲/۹۸ درصد به‌دست آمد (۱۲). گلبابایی و همکاران مطالعه‌ای را روی سیستم‌های بی‌هوازی با نرخ زیاد نظیر فیلترهای بی‌هوازی و رآکتور بی‌هوازی لجن با جریان رو به بالا (UASB) انجام دادند. فاضلاب مورد بررسی، فاضلاب خروجی از صنایع غذایی بود. بررسی آنها نشان داد، سیستم‌های بی‌هوازی با نرخ بالا به‌دلیل برخورداری از قابلیت پذیرش و هضم و غلظت بالای مواد آلی، همواره از گزینه‌های مؤثر و پرکاربرد در تصفیه فاضلاب صنایع هستند. در این پژوهش کارایی حذف COD به‌میزان ۸۷ درصد و همچنین کاهش TSS نیز از ۴۳ به ۸ گرم بر لیتر مشاهده شد (۱۰). خالصی‌دوست و همکاران در پژوهشی که به روش تصفیه هوازی روی فاضلاب بیمارستانی، در دو شرایط بدون هوادهی و هوادهی با دیفیوزر انجام گرفت، میزان حذف مواد آلی را بررسی کردند. کارایی حذف COD در شرایط بدون هوادهی ۶۸/۵ درصد و با هوادهی حدود ۷۹ درصد حاصل شد. در این پژوهش افزایش اکسیژن محلول از ۳/۹ به ۴/۴ گرم در لیتر، افزایش راندمان حذف COD را به‌میزان ۱۵ درصد در زمان هوادهی نشان می‌دهد (۱۳). زرولی و همکاران به‌منظور بررسی عملکرد سیستم لجن فعال در تصفیه فاضلاب صنعتی شهرک صنعتی آق‌قلا نشان دادند که میانگین کل راندمان حذف BOD_5، COD و TSS به‌ترتیب برابر ۹۹/۶۶، ۹۸/۲۰ و ۹۷/۶۰ درصد محاسبه شده است (۱۹).

چلیاپان و گلار بررسی و امکان استفاده از رآکتورهای بی‌هوازی قبل از سیستم اصلی تصفیه فاضلاب خانگی، برای بالا بردن راندمان حذف و به‌دست آوردن پساب با کیفیت مطلوب را بررسی کردند. COD ورودی به سیستم بیش از ۸۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود که با ایجاد یک سیستم پیش‌تصفیه با بستر ثابت و جریان رو به بالا حذف مواد آلی، مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهش با بررسی حذف مواد آلی و انجام آزمایش COD در مدت ۱۰۹ روز با نرخ بارگذاری مختلف، توانسته است به راندمان حذف۶۰ الی ۷۰ درصد در شرایط بی‌هوازی دست پیدا کند (۶). لیو و همکاران استفاده همزمان از دو فرایند بی‌هوازی و هوازی و مقایسه روش‌های مختلف این دو فرایند در کاهش حجم لجن در رآکتورهای تصفیه فاضلاب را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، سیستم‌ها و روش‌های تصفیه دوگانه هیبریدی مورد مطالعه قرار گرفت. روش هوازی و بی‌هوازی به کاربرده شده در این پژوهش، تصفیه فاضلاب با در نظرگرفتن کارایی حداقل را نشان می‌دهد. این سیستم تصفیه دارای سیستم جذبی و یک سیستم هضم‌کننده بی‌هوازی است که بخشی از گل‌ولای و لجن را جذب کرده است و تغییر ماهیت می‌دهد. در این سیستم احتیاج به یک مخزن تصفیه بی‌هوازی است که نیاز به اکسیژن برای بخش مخزن جذبی گل‌ولای را کاهش می‌دهد (۱۴).

ممانعت از آلودگی منابع آب سطحی به‌عنوان عمده‌ترین

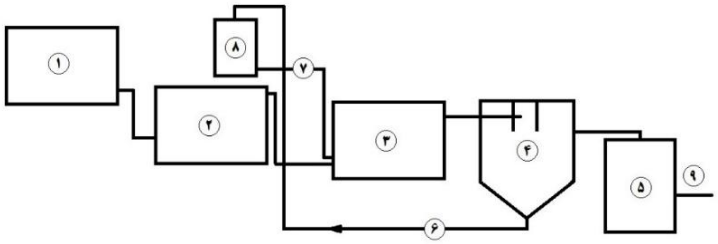
منابع آب آشامیدنی مورد استفاده انسان، سهم عمده‌ای در توسعه بهداشت ملی و منطقه‌ای دارد. در نتیجه، باتوجه به مسایل فوق جهت تأمین شرایط بهینه بهداشت، دسترسی به منابع آب جدید، بازیافت آب و توجه به محدودیت منابع آب، تصفیه فاضلاب امری ضروری و لازم است. از این‌رو روش‌های متنوع و مختلفی در زمینه تصفیه فاضلاب در دنیا مورد بررسی و استفاده قرار گرفته است. بسته به نوع فاضلاب، نوع استفاده، ارزش اقتصادی آب در منطقه و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه می‌توان روش تصفیه مناسب را انتخاب کرد. بنابراین هدف از این پژوهش کاهش COD و BOD_5 با استفاده از فرآیند ترکیبی AO در تصفیه فاضلاب صنعتی حاصل از صنایع فلز است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در تصفیه‌خانه فاضلاب (با فاضلاب ورودی صنایع فلزی) شهرک صنعتی۱ نجف‌آباد واقع در پنج کیلومتری پلیس‌راه این شهر انجام شد. در این تصفیه‌خانه از روش ترکیبی بی‌هوازی- هوازی (AO) استفاده شد، به‌طوری که برای اجرای فاز بی‌هوازی از بیوفیلتر با جریان رو به بالا استفاده شد و پکینگ مورد استفاده در این تصفیه‌خانه از نوع لانه زنبوری با سطح ویژه ۲۴۰ مترمربع بر مترمکعب بود، از طرفی فاز هوازی از نوع لجن فعال تلفیقی مدیای معلق با سطح ویژه ۳۰۰ مترمربع بر متر مکعب است. پایلوت مورد استفاده در این پژوهش شامل پنج مخزن (مخزن متعادل‌ساز، حوضچه بی‌هوازی، حوضچه هوازی، ته‌نشینی لجن و برگشت لجن) بود که با استفاده از اختلاف بار ارتفاعی، آب از مخزن با ارتفاع بالاتر به مخزن مجاور جریان می‌یابد. بدین صورت که مخزن متعادل‌ساز دارای حجم ۱۰۰ لیتر، در بالاترین ارتفاع نسبت به حوضچه‌های هوازی و بی‌هوازی قرار دارد. مخزن مذکور به‌منظور جلوگیری از ایجاد شوک‌های بار آلی، اسیدی و یا سمی در اغلب سیستم‌های تصفیه استفاده می‌شود. مدیای مورد استفاده در قسمت بی‌هوازی از نوع PANPAK بود که دارای سطح ویژه ۳۰۰ مترمربع بر مترمکعب است و برای ایجاد بستری مناسب برای رشد میکروارگانیسم‌ها استفاده شد. در مخزن بی‌هوازی به‌منظور جلوگیری از جریان میان‌بر، ورود فاضلاب از پایین و نزدیک به کف و خروجی آن از ارتفاع بالا و نزدیک سطح آب استفاده شد. در مخزن هوادهی از مدیاهای مکعبی شکل با سطح ویژه بیشتر نسبت به مخزن بی‌هوازی (۸۰۰ مترمربع در مترمکعب) استفاده شد تا شرایط بهتری برای رشد میکروارگانیسم‌ها ایجاد کند. از مخزن ته‌نشینی به‌منظور ته‌نشینی لجن و جداسازی پساب تصفیه‌شده از لجن استفاده شد. لازم به ذکر است که در این پایلوت شیرهای کنترلی و تخلیه‌ای نیز برای تنظیم میزان دبی وجود دارند. قطر لوله‌هایی که مخازن را به هم ارتباط می‌دهند، تقریبا ۱/۲۵ سانتی‌متری است. شکل (۱) پلان پایلوت را نشان می‌دهد.

پس از مستقر کردن پایلوت در محل، پایدارسازی قسمت بی‌هوازی به‌منظور رسیدن رشد توده میکروبی به مقدار مورد نیاز برای تصفیه، سه ماه به طول انجامید. بعد از پایدارسازی نسبی برای سرعت بخشیدن به رشد میکروارگانیسم‌ها در قسمت هوادهی، لجن فعال به‌صورت مصنوعی به سیستم تزریق شد. در طی این مدت آزمایش‌های کنترلی نیز انجام گرفت. بعد از حدود یک ماه از شروع بارگذاری، آزمایشات COD به‌صورت هفتگی انجام گرفت. در طول این مدت تشکیل بیوفیلم روی مدیا به وضوح مشاهده شد. در این پژوهش از سیستم ترکیبی فاضلاب AO با راهبری پیوسته استفاده شده است. تصفیه ترکیبی AO ترکیبی از دو فاز هوازی و بی‌هوازی است که این دو فاز نقش مکمل همدیگر را ایفا می‌کنند. فاز بی‌هوازی مقدار قابل توجهی از بار آلی را کاهش داده است و در ادامه فاز هوازی یا همان لجن فعال با کاهش بار آلی و دیگر پارامترهای آلودگی، کیفیت پساب خروجی را در حد قابل‌قبولی بهبود می‌بخشد. در پایان دو فاز، نیاز به یک حوضچه ته‌نشینی است.

پس از مستقر کردن پایلوت در محل، پایدارسازی قسمت بی‌هوازی برای رسیدن رشد توده میکروبی به مقدار مورد نیاز



۱- مخزن متعادل‌ساز ۴- مخزن ته‌نشینی ۷- خط انتقال لجن به مخزن هوادهی

۲- مخزن بی‌هوازی ۵- مخزن ذخیره ۸- مخزن لجن برگشتی

۳- مخزن هوازی ۶- خط انتقال لجن برگشتی ۹- لوله خروجی پایلوت

شکل ۱. شماتیک ساده از پایلوت مورد استفاده

برای تصفیه، سه ماه به طول انجامید. بعد از پایدارسازی نسبی برای سرعت بخشیدن به رشد میکروارگانیسم‌ها در قسمت هوادهی، لجن فعال به‌صورت مصنوعی به سیستم تزریق شد. در طی این مدت آزمایش‌های کنترلی نیز انجام گرفت. بعد از حدود یک ماه از شروع بارگذاری، آزمایشات COD به‌صورت هفتگی انجام گرفت. در طول این مدت تشکیل بیوفیلم روی مدیا به وضوح مشاهده شد. در این پژوهش از سیستم ترکیبی فاضلاب AO با راهبری پیوسته استفاده شده است. تصفیه ترکیبی AO ترکیبی از دو فاز هوازی و بی‌هوازی است که این دو فاز نقش مکمل همدیگر را ایفا می‌کنند. فاز بی‌هوازی مقدار قابل توجهی از بار آلی را کاهش داده و در ادامه فاز هوازی یا همان لجن‌فعال با کاهش بار آلی و دیگر پارامترهای آلودگی کیفیت پساب خروجی را در حد قابل‌قبولی بهبود می‌بخشد. در پایان دو فاز، نیاز به یک حوضچه ته‌نشینی است.

فاضلاب خروجی از هوادهی حاوی مقدار زیادی مواد معلق بیولوژیکی است و برای بهبود کیفیت پساب و زلالیت آب خروجی باید این مواد در حوضچه، ته‌نشین شده و مجدداً به حوضچه هوادهی انتقال یابند. در صورت کم شدن غلظت میکروارگانیسم‌ها در حوضچه هوادهی، راندمان تصفیه نیز ممکن است به همان نسبت کاهش یابد. برای اندازه‌گیری COD (به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر برای تعیین کیفیت پساب و فاضلاب) از سه نقطه ورودی، خروجی بی‌هوازی و خروجی ته‌نشینی نمونه‌گیری انجام شد.

برای اندازه‌گیری شاخص COD از روش نورسنجی به‌صورت هفتگی استفاده شد. برای اندازه‌گیری شاخص BOD_5 به مدت پنج روز نمونه‌ها در انکوباتور نگهداری شد و پس از آن با سنجنده‌ی BOD میزان این شاخص اندازه‌گیری شد. از طرفی برای اندازه‌گیری این شاخص از سه نقطه ورودی، خروجی بی‌هوازی و خروجی ته‌نشینی نمونه‌گیری انجام شد. در جدول (۱) دستگاه‌ها و مواد مورد نیاز برای اندازه‌گیری شاخص‌های مورد بررسی ارائه شده است.

برای تعیین زمان ماند هیدرولیکی بهینه فاز بی‌هوازی و هوازی، میزان راندمان حذف COD در سه سطح ۱۲، ۱۸ و ۲۰ ساعت با پنج تکرار انجام گرفت یا به‌عبارتی دیگر برای هر کدام از فازها در هر زمان ماند (۸، ۱۲ و ۲۰ ساعت) میزان COD و BOD_5 ورودی و خروجی پنج بار آلی مختلف (پنج فاضلاب مختلف) اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است درتمامی سطوح، زمان ماند هیدرولیکی از طریق شیرهای کنترلی روی لوله ورودی به هر فاز انجام شد. هدف اصلی این پژوهش بررسی کارایی روش تصفیه AO برای حذف مواد آلی و مواد مغذی است. از این رو راندمان‌های حذف شاخص‌های COD و BOD_5 گزارش شده و از رابطه (۱) محاسبه شد (۴).

$$Ra = \frac{(V_{in} - V_{out})}{V_{in}} \times ۱۰۰ \qquad (۱)$$

جدول ۱. دستگاه‌ها و مواد مورد نیاز برای اندازه‌گیری شاخص‌های COD و BOD_5

شاخص مورد بررسی	دستگاه‌ها و مواد مورد نیاز	مدل و ویژگی
COD	CODسنج	مدل AL۲۵۰ ساخت شرکت آکوالتیک آلمان
	هاضم حرارتی	مدل ET۱۰۸ ساخت شرکت آکوالتیک آلمان
	ویال اندازه‌گیری COD دامنه پایین	دامنه ۱۵۰-۰ میلی‌گرم بر لیترساخت شرکت آکوالتیک آلمان
	ویال اندازه‌گیری COD دامنه متوسط	دامنه ۱۵۰۰-۰ میلی‌گرم بر لیترساخت شرکت آکوالتیک آلمان
BOD_5	BODسنج	مدل $AL^{۶۰۶}$ ساخت شرکت آکوالتیک آلمان
	انکوباتور	ساخت شرکت آکوالتیک آلمان
	محلول نیتریفیکاسیون	ساخت شرکت آکوالتیک آلمان
	محلول پتاسیم‌هیدروکسید	ساخت شرکت آکوالتیک آلمان

Ra: راندمان حذف برحسب درصد

V_{in}: غلظت ورودی برحسب میلی‌گرم بر لیتر

V_{out}: غلظت خروجی برحسب میلی‌گرم بر لیتر

در این پایلوت برای جلوگیری از کاهش غلظت توده میکروبی هر یک ساعت یک بار برگشت داده شده است. تمام لجن به‌دلیل کیفیت خوب و سن پایین آن به سیستم برگشت داده شده و هیچ‌گونه لجن مازادی از سیستم دفع نشده است. میزان برگشت لجن و اندیس حجم لجن مخزن هوازی تابعی از ته‌نشینی نیم ساعته (SSV) و MLSS (Mixed liquor suspended solids) است که با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود. در جدول ۲ مقادیر اندیس حجمی لجن در فاز هوازی ارائه شده است.

$$SVI = \frac{(SSV \times ۱۰۰۰)}{MLSS} \quad (۲)$$

در انتها نتایج با نرم‌افزار SAS (ver. ۹/۰) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. نمودار مربوط به هر یک از صفات با استفاده از نرم‌افزار Excel ترسیم شد.

نتایج و بحث

با توجه به آزمایش‌های انجام شده روی فاضلاب ورودی به پایلوت، بازه تغییرات پارامترهای مورد مطالعه مشخص شد. جدول (۳) حدود پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می‌دهد.

شاخص COD

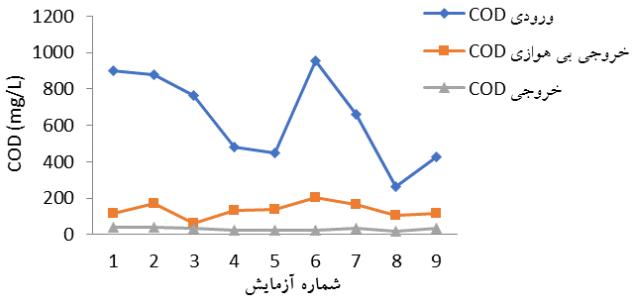
نتایج حاصل از اندازه‌گیری COD طی زمان نمونه‌برداری در شکل ۲ آمده است. در این مطالعه هر پنج تا هفت روز یک بار و در ۹ تکرار اقدام به نمونه‌برداری و اندازه‌گیری COD شده است. در این نمودار مشاهده می‌شود که فاز هوازی به‌طور متوسط COD را از ۶۴۲ به ۱۳۳ میلی‌گرم بر لیتر کاهش داده است. تطابق مقادیر کمینه و بیشینه COD ورودی و خروجی بی‌هوازی، بیانگر این است که COD ورودی در میزان تصفیه فاز بی‌هوازی بی‌تأثیر نبوده است. فاز هوازی نیز میزان COD فاز بی‌هوازی را به‌طور میانگین به ۳۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر رسانده است. این نمودار نشان‌دهنده تأثیر ناچیز COD خروجی بی‌هوازی بر COD خروجی (جز در محدوده‌های بسیار بالا و یا بسیار پایین) است. همچنین با توجه به نمودار، غلظت COD ورودی پایلوت تأثیر چندانی بر غلظت COD خروجی ندارد. با افزایش بار آلی ورودی، کاهش میزان COD متناسب با کاهش اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی بود. دلیل افزایش حذف متناسب با افزایش بار آلی ورودی، افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های هوازی برای هضم بار آلی ورودی متناسب با میزان آن است. از طرفی وجود مدیا با سطح ویژه بیشتر در فاز هوازی، بستر لازم جهت حداکثر فعالیت را برای میکروارگانیسم‌های هوازی فراهم می‌کند. شکل (۳) نشان‌دهنده راندمان کلی حذف COD پایلوت و راندمان هر کدام از فازهای بی‌هوازی و هوازی است.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای SVI (اندیس حجمی لجن) فاز هوازی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر

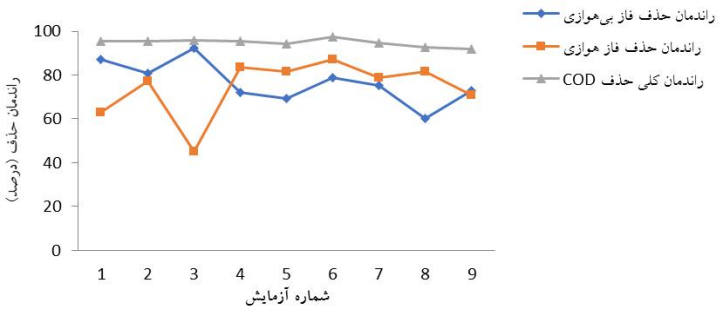
آزمایش	SSV	SVI	MLSS	MLVSS
۱	۲۶۰	۱۱۳	۲۳۰۰	۱۹۰۰
۲	۲۴۰	۱۰۶	۲۲۶۰	۱۷۲۰
۳	۲۲۰	۱۰۶	۲۰۸۰	۱۴۸۰
۴	۲۳۰	۱۰۵	۲۱۸۰	۱۴۶۰
۵	۲۲۰	۱۰۷	۲۱۴۰	۱۳۶۰
۶	۲۲۵	۱۰۱	۲۲۲۰	۱۴۴۰
۷	۲۱۰	۱۰۰	۲۱۰۰	۱۳۴۰
۸	۱۹۰	۹۲	۲۰۶۰	۱۶۰۰
۹	۲۳۰	۱۰۹	۲۱۰۰	۱۵۶۰
۱۰	۲۱۰	۱۰۴	۲۰۱۰	۱۳۲۰
۱۱	۲۱۰	۱۰۰	۲۹۰	۱۳۰۰
۱۲	۲۲۰	۱۰۶	۲۰۸۰	۱۳۹۰
میانگین	۲۲۲	۱۰۴/۰۸	۲۱۳۵	۱۴۸۹

جدول ۳. بازه تغییرات پارامترهای مورد مطالعه فاضلاب ورودی

پارامتر	بازه تغییرات	واحد اندازه‌گیری
COD	۲۰۰–۱۰۰۰	میلی‌گرم بر لیتر
BOD_5	۲۰۰–۳۰۰	میلی‌گرم بر لیتر



شکل ۲. مقدار COD ورودی، خروجی پایلوت و خروجی بی‌هوازی در زمان ماند



شکل ۳. راندمان حذف COD در قسمت هوازی، بی‌هوازی و کل پایلوت در زمان ماند

میانگین کارایی حذف فاز بی‌هوازی برای COD برابر با ۷۶/۵۱ درصد و برای فاز هوازی این مقدار برابر با ۷۴/۳۵ درصد است. میانگین کلی حذف در روش تصفیه ترکیبی برابر با ۹۴/۸۰ درصد است. این نمودار نشان‌دهنده مکمل بودن دو فاز است، زیرا زمانی که فاز بی‌هوازی راندمان بالاتری دارد، راندمان حذف فاز هوادهی کم می‌شود. برعکس، اگر در شرایطی فاز بی‌هوازی قدرت حذف کمتری داشته باشد، فاز هوادهی این ضعف را جبران کرده و درصد بیشتری را حذف می‌کند. دلیل این امر این است که وقتی در فاز اول مقدار کمی از اکسیژن شیمیایی محلول حذف می‌شود، زیاد بودن اکسیژن محلول به‌جای مانده، شرایط بهتری را از نظر غذایی برای میکروارگانیسم‌های فاز بعدی آماده می‌کند و در این حالت میکروارگانیسم‌های هوازی غذای بیشتری برای تکثیر و رشد و فعالیت داشته و به تبع میزان مواد آلی بیشتری را حذف می‌کنند. اما در حالت کلی درصد حذف پایلوت تغییر چندانی ندارد. با افزایش بار آلی ورودی، کاهش میزان COD متناسب با کاهش اکسیژن‌خواهی بیوشیمیای خواهد بود. دلیل افزایش حذف متناسب با افزایش بار آلی ورودی، افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های هوازی برای هضم بار آلی ورودی متناسب با میزان افزایش بار آلی است. دلیل هم‌پوشانی می‌تواند این موضوع باشد که میکروارگانیسم‌ها متناسب با میزان بار آلی ورودی فعالیتشان افزایش یا کاهش یافته و تا جایی‌که اکسیژن خواهی به حداکثر میزان خود برسد، در این حالت بستر لازم برای فعالیت حداکثری میکروارگانیسم‌ها فراهم است، اما تا محدوده‌های خاص از بار آلی را کاهش می‌دهند.

شاخص BOD_5

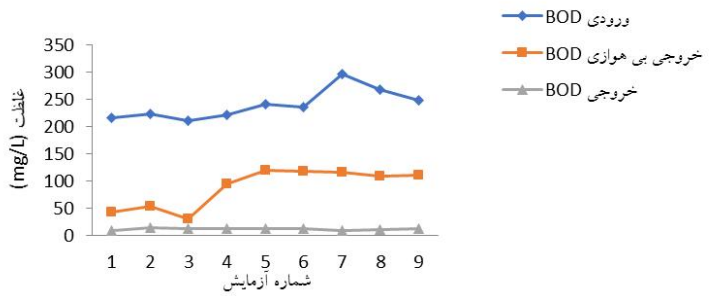
شکل (۴) نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های BOD_5 در طول پژوهش را نشان می‌دهد. این نمودار نشانگر تأثیر دو فاز روی حذف BOD_5 و همچنین قدرت بالای این روش در حذف BOD_5 است. حوضچه بی‌هوازی این پایلوت به‌طور میانگین میزان BOD_5 را از ۲۴۰ به ۸۸ میلی‌گرم بر لیتر و فاز هوادهی آن را به ۱۱/۲۲ میلی‌گرم بر لیتر کاهش داده است. نقاط بیشینه و کمینه این نمودار بیانگر شدت تأثیر بیشتر BOD_5 خروجی فاز بی‌هوازی از ورودی نسبت به نمودار COD است که دلیل آن را می‌توان شوک‌های پساب ورودی و پایین بودن زمان ماند قسمت بی‌هوازی نسبت به زمان ماندهای متداول طراحی ذکر کرد. در حالت کلی شوک‌های بار آلی تأثیر چندانی بر میزان خروجی پساب نداشته‌اند، زیرا فاز هوادهی فرصت کافی برای جذب میزان بار باقی‌مانده را دارا است.

شکل (۴) نشان‌دهنده راندمان کلی حذف BOD_5 پایلوت و راندمان هر کدام از فازهای بی‌هوازی و هوازی است. نمودار نشان‌دهنده میانگین حذف ۶۳/۸۶ درصدی BOD_5 در فاز بی‌هوازی و حذف ۸۳/۹۹ درصدی BOD_5 در فاز هوازی است. این در حالی است که راندمان کلی حذف BOD_5 برای پایلوت برابر با ۹۵/۲۵ درصد به‌دست آمده است. با بررسی نمودار مشاهده می‌شود که این دو فاز هم‌پوشانی خوبی با هم داشته و در صورتی‌که بازده حذف فاز اول کاهش یابد فاز دوم یعنی هوادهی این کاهش را جبران کرده و به‌دلیل وجود مواد مغذی بیشتر برای رشد میکروارگانیسم‌ها، حذف را با قدرت بیشتری انجام می‌دهد. بر اساس استانداردهای زیست‌محیطی ایران، استاندارد خروجی BOD_5 برای تخلیه به آب‌های سطحی ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و برای مصارف کشاورزی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است (۵). در حالی که بر اساس یافته‌های حاصل از این مطالعه، میزان BOD_5 پساب خروجی در زیر حد استاندارد برای مصارف کشاورزی است. شکل (۵) نشان‌دهنده راندمان کلی حذف BOD_5 پایلوت و راندمان هر کدام از فازهای بی‌هوازی و هوازی است.

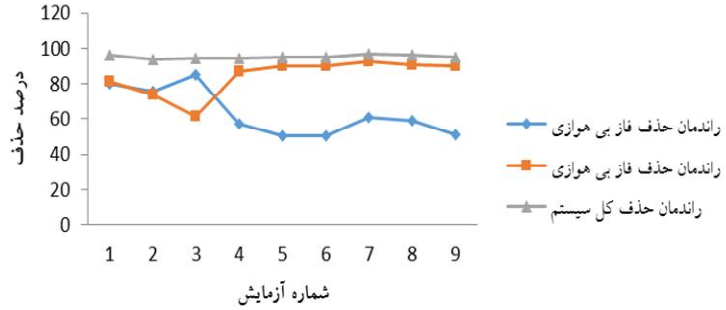
براورد زمان ماند مطلوب

۱- فاز بی‌هوازی

مقادیر درصد حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی برای زمان‌های ماند مورد مطالعه (۱۲، ۱۸ و ۲۰ ساعته هر کدام در پنج تکرار) و مقایسه میانگین داده‌ها که با استفاده از آزمون توکی مورد تجزیه قرار گرفتند، در جدول ۴ و ۵ ارائه شده است.



شکل ۴. مقادیر BOD_5 ورودی، خروجی پایلوت و خروجی بی‌هوازی در زمان ماند



شکل ۵. راندمان حذف BOD_5 در قسمت هوازی، بی‌هوازی و کل پایلوت در زمان ماند

جدول ۴. مقادیر راندمان حذف COD در فاز بی‌هوازی در زمان ماندهای مختلف

سطح یک (۱۲ ساعت)	سطح دو (۱۸ ساعت)	سطح سه (۲۰ ساعت)
۵۶/۹	۶۱/۵	۶۶/۸
۵۵/۳	۶۰/۲	۶۸/۵
۵۴/۷	۶۰/۳	۷۱
۵۸/۵	۶۳/۴	۶۹/۵
۵۸/۵	۶۲/۸	۶۷/۹

جدول ۵. پارامترهای آماری آزمون مقایسه میانگین توکی برای زمان ماندهای مختلف در فاز بی‌هوازی

پارامتر آماری	مقدار
P. value	کمتر از ۰/۰۰۱
انحراف معیار	۵/۳
میانگین خطای استاندارد (Standard error mean)	۱/۳۷
ضریب تغییرات	۸/۴۹
واریانس	۲۸/۰۷
میانگین و سید سطح یک	۵۶/۷۲ و سید C
میانگین و سید سطح دو	۶۱/۶۴ و سید B
میانگین و سید سطح سه	۶۸/۷۴ و سید A

جدول ۶. مقادیر راندمان حذف COD در فاز هوازی در زمان ماندهای مختلف

سطح یک (۸ ساعت)	سطح دو (۱۲ ساعت)	سطح سه (۱۵ ساعت)
۷۸/۵	۹۳/۵	۹۴/۸
۸۱/۲	۹۴/۱	۹۴/۷
۸۲/۳	۹۴/۲	۹۵/۵
۷۹/۵	۹۳/۵	۹۴/۲
۸۱/۴	۹۴/۸	۹۵/۲

جدول ۷. پارامترهای آماری آزمون مقایسه میانگین توکی برای زمان ماندهای مختلف در فاز هوازی

پارامتر آماری	مقدار
P. value	کمتر از ۰/۰۰۱
انحراف معیار	۶/۸۴
میانگین خطای استاندارد	۱/۷۷
ضریب تغییرات	۷/۶۱
واریانس	۴۶/۷۷
میانگین و سید سطح یک	۸۰/۵۸ و سید B
میانگین و سید سطح دو	۹۴/۰۲ و سید A
میانگین و سید سطح سه	۹۴/۸۸ و سید A

بررسی جدول (۵) نشان می‌دهد که سه سطح زمان ماند دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد در حذف COD هستند. یعنی با افزایش زمان ماند هیدرولیکی از ۱۲ به ۲۰ ساعت، پیشرفت چشمگیری در راندمان حذف COD حاصل شده است. لازم به ذکر است که ارقام ارائه شده در جدول ۴ به صورت حاصل تقسیم، تفاضل غلظت ورودی و خروجی بر میزان غلظت ورودی هستند. بر اساس نتایج به‌دست آمده بیشترین میزان راندمان حذف COD با ۶۸/۷۴ مربوط به تیمار سطح سه (زمان ماند ۲۰ ساعت) است و کمترین میزان راندمان حذف COD با میزان مربوط ۵۶/۷۲ به تیمار سطح یک (زمان ماند ۱۲ ساعت) است (جدول ۵). با توجه به اینکه در این مقایسه مقدار مطلوب مد نظر است، سطح یک یعنی ۱۲ ساعت با میانگین حذف ۵۶/۷۲ راندمان قابل قبول و مطلوبی را ارائه می‌دهد. معمولاً در طراحی سیستم‌های بی‌هوازی، راندمان بیشتر از ۵۰ درصد برای حذف مواد آلی، راندمانی مطلوب محسوب می‌شود (۱۷). از طرفی در این پایلوت یک مرحله تصفیه دیگر نیز که فاز هوازی است می‌تواند ادامه حذف را انجام دهد. به این ترتیب زمان ماند هیدرولیکی ۱۲ ساعت به‌عنوان زمان ماند هیدرولیکی فاز بی‌هوازی در نظر گرفته شد.

۲- فاز هوازی

در این مرحله نیز با اعمال سه سطح ۸، ۱۲ و ۱۵ ساعت در پنج تکرار، درصد حذف COD اندازه‌گیری شد که مقادیر آن در جدول (۶) ارائه شده است.

این داده‌ها نیز به روش آزمون مقایسه میانگین داده‌های زمان ماندهای مختلف در فاز هوازی در جدول (۷) ذکر شده است. با توجه به جدول (۷)، اختلاف معنی‌داری بین سطح ۱ با زمان ماند هیدرولیکی ۸ ساعت با سطح دو و سه وجود دارد. اما بین سطح دو و سه اختلاف معنی‌داری وجود ندارد، با این وجود که میانگین سطح سه کمی بیشتر است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده این موضوع است که بیشترین میزان راندمان حذف COD برای فاز هوازی با ۹۴/۸۸ مربوط به تیمار سطح سه

(زمان ماند ۱۵ ساعت) است و کمترین میزان راندمان حذف COD برای فاز هوازی با میزان مربوط ۸۰/۵۸ به تیمار سطح یک (زمان ماند ۸ ساعت) است (جدول ۵). بنابراین زمان ماند ۱۲ ساعت برای فاز هوازی به‌عنوان زمان ماند مطلوب در نظر گرفته شده است. به این ترتیب زمان ماند هیدرولیکی کلی پایلوت از جمع دو زمان ماند به‌دست آمده از هر فاز و معادل ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. دلایل وجود تفاوت در داده‌های کارایی حذف COD گزارش شده در جدول های ۴ و ۶ می‌تواند این باشد که فاز بی‌هوازی و هوازی از لحاظ نوع میکروارگانیسم‌ها و همچنین نوع فعالیت آنها با هم متفاوت بوده و از طرفی میزان بار آلی ورودی به هر فاز با هم متفاوت است. پساب ورودی به فاز اول دارای بار بالا بوده و با عبور از فاز بی‌هوازی قسمت عمده بار آلی آن کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری

روش تصفیه ترکیبی بی‌هوازی- هوازی معمولاً با زمان ماندهای بیشتر از ۴۸ ساعت در تصفیه‌خانه‌ها بهره‌برداری می‌شود. با توجه به مقایسه پایلوت با تصفیه‌خانه‌های بهره‌برداری شده با روش AO با زمان ماندهای ۶۰ ساعت می‌توان کارایی پایلوت در زمان ماندهای پایین را متذکر شد و ۲۴ ساعت را به‌عنوان زمان ماندی مطلوب برای این پایلوت معرفی کرد. درنتیجه امکان فعالیت در زمان ماندهای پایین از جمله ویژگی‌های مطلوب این پایلوت است. این روش در قسمت بی‌هوازی میانگین COD را از ۶۴۲ به ۱۳۳ و BOD_5 را از ۲۴۰ به ۸۸ میلی‌گرم بر لیتر و در قسمت هوادهی به‌ترتیب COD و BOD_5 را از۱۳۳ به ۳۰/۵ و از ۸۸ به ۱۱/۲ میلی‌گرم بر لیترکاهش می‌دهد. از جمله مزایای این روش تصفیه ترکیبی، هم‌پوشانی و جبران کم‌کاری هر فاز توسط فاز دیگر است. میانگین حذف COD برابر با ۹۴/۸۰ و میانگین کارایی حذف BOD_5 برابر با ۹۵/۲۴ درصد است که در مقایسه با تصفیه‌خانه‌های مشابه با زمان ماند تقریباً دو برابر زمان ماند پایلوت، راندمان بسیار مطلوبی محسوب می‌شود. نتایج حاصل حاکی از آن است که روش تصفیه ترکیبی AO گزینه‌ای مناسب برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی با بار آلی نسبتاً زیاد است. این روش می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش لجن فعال متداول و سیستم‌های بی‌هوازی باشد.

منابع مورد استفاده

1. Adam, C., R. Gnirb, B. Lesjean, H. Buisson and M. Kraume. 2006. Enhanced biological phosphorus removal in membrane bioreactors. *Water Science and Technology* 46: 281–286.
2. Ahmadi, M., M. Tajrishi and A. Abrishamchi. 2005. Technical and economic comparison of conventional wastewater treatment systems in the sugar industries in Iran. *Journal of Water and Wastewater* 53: 54-61. (In Farsi).
3. Alavi, S. Z., H. Mojtahedzadeh, F. Amin, A. P. Savoji. 2013. Relationship between emotional intelligence and organizational commitment in Iran's Ramin thermal power plant. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 84: 815-9.
4. Beutel, M. W., C. D. Newton, E. S. Brouillard and R. J. Watts. 2009. Nitrate removal in surface-flow constructed wetlands treating dilute agricultural runoff in the lower Yakima Basin. Washington. *Ecological Engineering* 35: 1538–1546.
5. Bortone, G., S. Marsili Libelli, A. Tilche and J. Wanner. 2000. Anoxic phosphate uptake in the dephanox process, *Water Sciences and Technology* 40 : 177–185.
6. Chelliapan, S. and S. Golar. 2011. Pre-treatment of antibiotic wastewater using an anaerobic reactor. Research *Journal of Chemical Sciences* 1(6): 59-63.
7. Chem, B. E. 2003. Computational fluid dynamics tools for the design of mixed anoxic wastewater treatment vessels. *Desalination* 236: 244-251
8. Dulekgurgen, E., S. Ovez, N. Artan and D. Orhon. 2003. Enhanced biological phosphate removal by granular sludge in a sequencing batch reactor. *Biotechnology Letters* 25(9): 687-693.
9. Fux, C. and H. Siegrist. 2004. Nitrogen removal from sludge digester liquids by nitrification-denitrification or

partial nitridation-anammox, environmental and economic considerations. *Water Science and Technology* 50(10): 19-26.

10. Golbabayi, F., G. Darvishi., A. Mahdavi and A. Asghari. 2012. Treatment of sewage sludge using UASB anaerobic reactors. *In:* Proceeding of the Second Planning and Environmental Management Conference. Iran. (In Farsi).
11. Kalyuzhngi, S., M. Gladchenko, E. Starosita, S. Shcherhakou and B. Versprille. 2005. Combined biological and physic–chemical treatment of bacers yeast wastewater incuging removal of coloures and reacalcitrant to biodegradution pollutants. *Water Science and Technology* 52: 175-181.
12. Khademazghadi, M., S. A. Mirbagheri., N. Mehrdadi and S. Sepehri. 2014. Investigation of the A2O and MBR combined process in advanced industrial wastewater treatment for carbon and phosphorus removal. *In:* Proceeding of the 7th National Conference and Specialized Exhibition of Environmental Engineering. Tehran. Faculty of Environment, University of Tehran. (In Farsi).
13. Khalesidoost, M., M. R. Vesali naseh and H. Sasani. 2012.Effect of aeration on RBC reactor in hospital wastewater treatment. *In:* Proceeding of the 9th International Congress of Civil Engineering, Isfahan University of Technology. (In Farsi).
14. Liu, W., E. J. Jordan and M .Roehl. 2016. Hybrid aerobic and anaerobic wastewater and sludge treatment systems and methods. *Evoqua Water Technologies Llc. U.S. Patent* 9,359,238.
15. Melidis, P., E. Vaiopoulou and A. Aivasidis. 2008. Development and implementation of microbial sensors for efficient process control in wastewater treatment plants. *Bioprocess Biosyst Engineering* 31 .31: 277–282.
16. Mousavi, S. M. 2011. Investigation of Performance Indicators of Wastewater Treatment Plant Operation. 14th National Conference on Environmental Health. Shahid Sadoughi University of Medical Sciences. Yazd. Iran. (In Farsi).
17. Nasri, A. 2013. Investigation of organic matter removal by combined wastewater treatment in decentralized wastewater treatment processes. MSc. Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Farsi).
18. Shahmoradi, M., M. Gholami, M. Mahayi, A. AbouyiMehrizi and R. Ghorbanpor. 2013. Evaluation of Bojnourd treatment plant by activated sludge removal in organic matter and neutrinos. *In:* Proceeding of the 16th Iranian National Environmental Health Conference. Iran. (In Farsi).
19. Zazouli, M., E. Ghahramani., M. Ghorbanian AlahAbad., A. Nikouie and M. Hashemi. 2010. Survey of Activated Sludge Process Performance in Treatment of Agghala Industrial TownWastewater in GolestanProvince in 2007. *Iranian Journal of Health and Environment* 3 (1) :59-66. (In Farsi).

Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)
Vol. 23, No. 3, Fall 2019, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Evaluation of COD and BOD_5 Removal Efficiency by Combined Treatment Aerobic-Anaerobic (AO) on Sewage of Metal Industries

O. Mohamadi[1*], M. Heidarpour[2] and S. Jamali[3]

(Received: November 1-2017 ; Accepted: December 12-2018)

Abstract

Shortage of water resources and renewable per capita in last 30 years is put Iran on crisis threshold. Wastewater reuse is one of the battle solutions for water shortage and prevents wastewater depletion and environmental pollution. Thus, a pilot scale experiment was carried out to evaluate an integrated anaerobic/aerobic treatment for removal of BOD_5 and COD, also to reduction of hydraulic retention time by considering optimum removal efficiency. The pilot was an anaerobic/aerobic bioreactor type under continuous-feeding regime based on a central composite design. The pilot was studied in different retention time and aeration was carried out between 5-15 hours. According to different retention times for COD removal efficiency, 24 hours was selected as optimum hydraulic retention time, that it is comparable to those obtained for 48 hours and over in plant roughly and could remove COD and BOD in acceptable ranges, results showed that average removal efficiency for BOD_5 were 63.86 and 83.99 percent in aerobic and anaerobic phases, respectively. The average removal efficiency for COD was 76.5 and 74.35 percent for anaerobic and aerobic sections, respectively. The average removal efficiency for BOD_5 and COD in this integrated aerobic-anaerobic pilot 95.24 and 94.8 percent, respectively.

Keywords: Anaerobic Biological Treatment, Biological Oxygen Demand, Chemical Oxygen Demand, Hydraulic Retention Time, Unconventional water

1. Water Engineering Department, Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2. Water Engineering Department, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
3. Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
*: Corresponding Author, Email: o.mohammadi333@gmail.com