Journal of Water & Wastewater Science & Engineering (jwwse)
Autumn 2017, Vol. 2, No. 3.
DOI: 10.22112/jwwse.2018.97395.1044

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دوم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶

The Investigation of Using Biological and Chemical Oxidation Combination Effect on Wastewater Treatment

Reza Irani[1], Ali Baradar Khoshfetrat[2] and Davood Kahforoushan[3*]
1- M.Sc. in Chemical Engineering, Biotechnology, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
2- Associated Professor, Department of Membrane and Biotechnology, Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
3- Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
* Corresponding Author, Email: kahforoushan@sut.ac.ir

Received: 4/9/2017
Revised: 2/12/2017
Accepted: 3/12/2017

Abstract

Recently, the use of hybrid techniques is taken into consideration in wastewater treatment to achieve a high efficiency and effective removal of contaminants especially for resistant contaminants. In this research, the process of a combination of chemical oxidation by ozone and biological oxidation by aerobic attached growth bioreactor in the different modes for treating of wastewater were studied. At first, the performance of aerobic biological reactor was alone studied. Synthetic wastewater (sodium acetate as carbon source and ammonium chloride as a source of nitrogen) with the initial COD of 300 mg/L and the ratio of carbon to nitrogen of 10 was used. The results showed that there is a complete nitrification in bioreactor and COD removal efficiency is 89%. When using ozone oxidation before biotreatment, it was seen that the efficiency of COD removal increased to 94.0% and TSS was achieved to 75 mg/L in output. In the next step, the ozonation was used after biotreatment and it was observed that COD removal efficiency increased to 97.0% and the amount of TSS also decreased to 35 mg/L in output. In the final step, ozonation was used simultaneously before and after biotreatment as pretreatment as well as final treatment. In this mode, the results showed that the efficiency of COD removal in the output of the system increased to 98.3% and the value of TSS was declined to 20 mg/L.

Keywords: Aerobic attached growth bioreactor, Combined treatment, Nitrification, Ozonation, Wastewater treatment.

مطالعه تاثیر استفاده از فرآیند ترکیبی ازناسیون و بیولوژیکی در تصفیه فاضلاب

رضا ایرانی[۱]، علی برادر خوش‌فطرت[۲] و داود کاه‌فروشان[۳*]
۱- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
۲- دانشیار، گروه بافت و بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: kahforoushan@sut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۱۳
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۶/۹/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۱۲

چکیده

در حال حاضر استفاده از روش‌های ترکیبی برای رسیدن به بازده بالا در تصفیه فاضلاب‌ها و حذف موثر آلاینده‌ها بخصوص آلاینده‌های مقاوم مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق به‌صورت آزمایشگاهی، فرآیند ترکیبی ازناسیون توسط ازن و اکسیداسیون بیولوژیکی توسط راکتور بیولوژیک چسبیده هوازی در حالت‌های مختلف برای تصفیه فاضلاب مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا عملکرد راکتور بیولوژیک رشد چسبیده هوازی به‌تنهایی بررسی شد. فاضلاب سنتزی (استات سدیم به‌عنوان منبع کربن و آمونیوم کلراید به‌عنوان منبع نیتروژن) با COD اولیه ۳۰۰ mg/L و نسبت کربن به نیتروژن برابر با ۱۰ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که نیتریفیکاسیون در بیوراکتور به‌طور کامل انجام گرفته و راندمان حذف COD برابر ۸۹٪ است. وقتی از ازن به‌عنوان پیش‌تصفیه قبل از بیوراکتور استفاده شد، مشاهده شد که راندمان حذف COD در خروجی سیستم به ۹۴٪ افزایش و مقدار TSS نیز به ۷۵ mg/L کاهش یافت. در مرحله بعد ازناسیون به‌عنوان تصفیه نهایی بعد از بیوراکتور انجام و مشاهده شد که راندمان حذف COD در خروجی سیستم به ۹۷٪ افزایش و مقدار TSS نیز به mg/L ۳۵ کاهش یافت. در مرحله آخر، ازناسیون به‌طور هم‌زمان هم به‌عنوان پیش‌تصفیه قبل از بیوراکتور و هم به‌عنوان تصفیه نهایی بعد از بیوراکتور استفاده شد، مشاهده شد که راندمان حذف COD در خروجی سیستم به ۹۸/۳٪ افزایش و مقدار TSS نیز به ۲۰ mg/L کاهش یافت.

کلمات کلیدی: بیوراکتور رشد چسبیده هوازی، ازناسیون، نیتریفیکاسیون، تصفیه تلفیقی، تصفیه فاضلاب.

۱- مقدمه

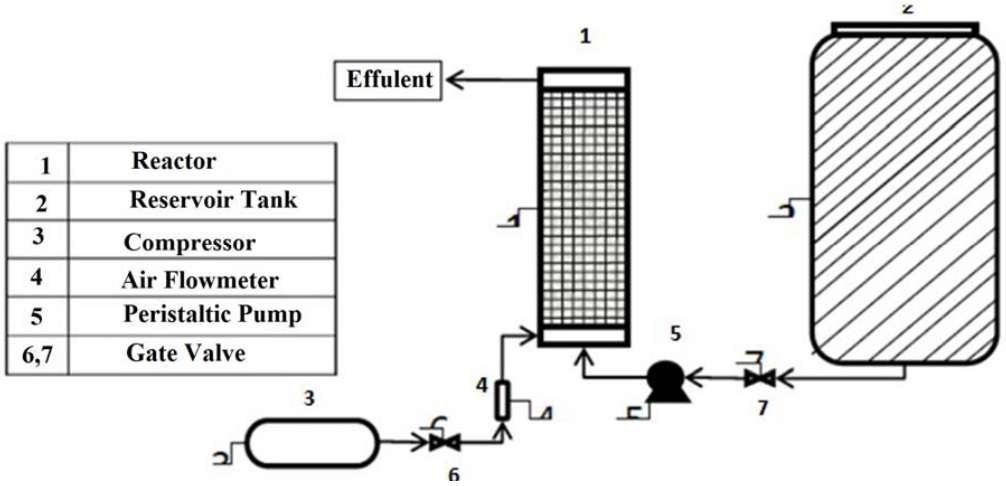
روش‌های اکسیداسیون شیمیایی به‌عنوان تکنولوژی‌های با توانایی بالا جهت حذف آلاینده‌های آلی که قابل حذف با روش‌های مرسوم بیولوژیکی نیستند مطرح شده‌اند. اما علی‌رغم کارایی بالای سیستم اکسیداسیون شیمیایی در مقایسه با سیستم‌های بیولوژیکی این سیستم‌ها معمولاً هزینه بالایی دارند. بنابراین ترکیب این روش با روش‌های بیولوژیکی به‌طور موثری می‌تواند کارآیی و هزینه‌های عملیاتی آنها را کاهش دهد (Schaar et al., 2010). ترکیب روش‌های ازناسیون به‌عنوان پیش‌تصفیه یا تصفیه نهایی بعد از عملیات بیولوژیکی در مورد گستره وسیعی از پساب‌های صنعتی واقعی و سنتزی به‌کار رفته است. در اکثر این تحقیقات نتیجه حاکی از این است که ترکیب این دو روش در افزایش بازده سیستم موثر بوده است (Van Haandel and Lettinga,1994). استراتژی‌های مختلف در ترکیب فرایند بیولوژیکی و ازناسیون به‌صورت‌های شیمیایی - بیولوژیکی، بیولوژیکی - شیمیایی و یا بیولوژیکی – شیمیایی - بیولوژیکی که به اختصار به‌ترتیب CHEM-BIO, BIO-CHEM, BIO-CHEM-BIO قابل انجام است. در نتیجه اثربخشی و هزینه‌های هرکدام از این روش‌ها باید به‌طور مستقل مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد (Klauson et al., 2015). یکی از کاربردهای جالب، استفاده از فرآیندهای اکسیداسیون برای پیش‌تصفیه به‌منظور تبدیل ترکیبات آلی مقاوم به ترکیبات تجزیه‌پذیر بیولوژیکی و حذف در فرآیندهای اکسیداسیون بیولوژیکی با هزینه‌های پایین است (Cohen, 2001). مطالعات نشان می‌دهد که تجزیه‌پذیری بیولوژیکی پساب‌ها هنگامی که در معرض پیش‌تصفیه توسط اکسیداسیون شیمیایی قرار می‌گیرند تغییر می‌کند (Oller et al., 2011). نقش اصلی پیش‌تصفیه شیمیایی، تبدیل قسمت مقام به تجزیه بیولوژیکی فاضلاب‌ها به‌حد واسطهای قابل تجزیه بیولوژیکی است درصد حذف در طول مرحله پیش‌تصفیه شیمیایی به‌دلیل کاهش دادن هزینه‌های غیرضروری مربوط به مواد شیمیایی مصرفی و انرژی (هزینه عملیاتی) باید حداقل شود (Oller et al., 2011). از آنجا که ۶۰٪ کل هزینه عملیاتی راکتورهای فتوکاتالیستی مربوط به مصرف الکتریسیته است، بحث انرژی بسیار مهم می‌باشد. با این‌حال چنان‌چه زمان پیش‌تصفیه خیلی کوتاه باشد حد واسطهای واکنشی تشکیل شده می‌توانند از لحاظ ساختاری مشابه ترکیبات اولیه غیرقابل‌تجزیه بیولوژیکی یا ترکیبات سمی اولیه باشند (Izanloo et al., 2006).

در مورد روش ترکیبی تصفیه بیولوژیکی و ازناسیون مطالعات زیادی صورت گرفته است. به‌عنوان نمونه در مطالعه‌ای که در زمینه حذف ریزآلاینده‌های مقاوم موجود از جمله مواد دارویی و بهداشتی در فاضلاب کشور استرالیا توسط Schaar et al. (2010) صورت گرفت، نتایج نشان داد که بازده حذف ریزآلاینده‌ها به میزان زیادی نسبت به فرآیند بیولوژیکی تنها افزایش یافته است. در تحقیق دیگری Zhang et al. (2010) برای تصفیه فاضلاب حاصل از کک‌سازی از ترکیب فرایند ازناسیون و فیلتر هوادهی شده بیولوژیکی استفاده کردند و نشان دادند که در این روش حذف مواد آلی نسبت به‌روش تصفیه بیولوژیکی تنها افزایش می‌یابد. در تحقیق دیگری توسط Beltran-Heredia et al. (2000) در زمینه تصفیه فاضلاب شستشوی زیتون سیاه با استفاده از فرآیند بیولوژیکی هوازی و ترکیب دو مرحله پیش‌تصفیه ازناسیون و مرحله تخریب بیولوژیکی هوازی، نتایج حاصل نشان‌دهنده افزایش بازده حذف ترکیبات فنولی و COD در فرایند ترکیبی تخریب بیولوژیکی و ازناسیون بود. همین‌طور تحقیقاتی در راستای حذف مواد دارویی و رایحه‌های مشک با استفاده از فرایند ازناسیون و فرایند ترکیبی ازناسیون و UV توسط Ternes et al. (2003) صورت‌گرفته است که نتایج بیانگر عملکرد بهتر فرآیند ترکیبی در حذف مواد دارویی و رایحه‌های مشک بود.

هدف از این تحقیق مطالعه تاثیر ترکیب روش ازناسیون و بیولوژیکی در حذف بار آلی فاضلاب‌ها است. بنابراین تاثیر روش ازناسیون به‌عنوان یک روش اکسیداسیون شیمیایی بر روی عملکرد راکتور غوطه‌ور رشد چسبیده هوازی در تصفیه فاضلاب مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از یک سیستم پایلوت بیولوژیکی به‌صورت ظرف استوانه‌ای به قطر داخلی ۱۲ و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و حجم کل ۵/۷ لیتر از جنس پلکسی گلاس به‌منظور انجام آزمون‌های تصفیه بیولوژیکی استفاده شد. در شکل ۱ نمودار بخش‌های مختلف سیستم پایلوت استفاده شده برای انجام آزمایشات ارائه شده است. در پایلوت به‌کار رفته جریان پساب و هوای ورودی به راکتور به‌صورت هم‌جهت و از پایین به بالا انتخاب شد. عمل



شکل ۱- نمودار بخش‌های مختلف سیستم پایلوت استفاده شده برای انجام آزمایشات

هوادهی توسط توزیع کننده‌های تعبیه شده در کف و جریان پساب ورودی توسط پمپ انجام شد. با استفاده از یک فلومتر شیشه‌ای مدرج، دبی هوای ورودی در مقدار L/min ۶ تنظیم شد. از مخزن پلی‌اتیلنی با ظرفیت ۵۰ لیتر برای ذخیره پساب ورودی به سیستم و تامین آن در طول شبانه‌روز استفاده شده است. این مخزن متناسب با بار هیدرولیکی اعمال شده مورد استفاده قرار گرفت. مخزن مجهز به درپوش بدون درز و شیر خروجی بود. کلیه مراحل انجام تحقیق با استفاده از فاضلاب سنتزی صورت‌گرفته که برای تهیه فاضلاب سنتزی از استات سدیم به‌عنوان منبع کربن و از آمونیوم کلراید به‌عنوان منبع نیتروژن با نسبت کربن به نیتروژن برابر با ۱۰ استفاده شد. همچنین از KH_2PO_4 به‌عنوان منبع فسفر استفاده شد. پس از

جدول ۱- مشخصات مواد پرکننده در بیوراکتور

ویژگی	مقدار
جنس	پلی پروپیلن
قطر داخلی (mm)	۲۲
قطر خارجی (mm)	۲۳/۸
ارتفاع (mm)	۲۶/۱
سطح هر قطعه (mm^2)	۳۷۵۵
حجم هر قطعه (cm^3)	۱۱/۶
نسبت سطح به حجم	۳۲۴
تعداد قطعه داخل راکتور	۱۵۰
تخلخل	۸۷۵
سطح کل بستر (m^2)	۰/۵۶۳

اندازه‌گیری، COD اولیه فاضلاب سنتزی mg/L ۳۰۰ تعیین شد. مقدار N برحسب آمونیوم و مقدار P برحسب فسفات دی هیدروژن پتاسیم با توجه به مقدار COD و نسبت بیان شده، به‌ترتیب mg/L ۳۰ و mg/L ۶ در نظر گرفته شد.

در مراحل آزمون تصفیه بیولوژیکی، به‌منظور فراهم کردن بستر رشد میکروبی در داخل راکتور، از مواد پرکننده ویژه‌ای استفاده شد. سبکی وزن، رنگ روشن، سطح مخصوص زیاد، سهولت تشکیل بیوفیلم و مقاومت مناسب در شرایط مختلف از ویژگی‌های مهم این مواد به‌شمار می‌روند (Jou et al., 2003). مشخصات این مواد در جدول ۱ داده شده است. از یک پمپ پریستالتیک برای تزریق فاضلاب به داخل بیوراکتور استفاده شده است.

اولین مرحله انجام این تحقیق، مرحله نصب و راه‌اندازی راکتور غوطه‌ور رشد چسبیده بود که به‌مدت ۱۵ روز به‌طول انجامید. در این مرحله پس از نصب قطعات و آب‌بندی راکتور، مواد بستر در درون راکتور قرار داده شد، سپس با استفاده از یک پمپ پریستالتیک نیمی از راکتور با لجن تهیه شده از سیستم لجن فعال تصفیه‌خانه تبریز پر شد. در مرحله راه‌اندازی راکتور به‌دلیل آن‌که هدف رشد میکروارگانیسم‌ها و تشکیل بیوفیلم است، از فاضلاب طبیعی شهر تبریز که مرحله تصفیه مقدماتی در تصفیه‌خانه بر روی آن انجام شده است و در مرحله ورود به تصفیه بیولوژیک است، خوراک راکتور تهیه شد. انتخاب خوراک طبیعی برای مرحله راه‌اندازی به‌دلیل سازگاری بیشتر میکروارگانیسم تهیه شده با خوراک بود. در مرحله راه‌اندازی، خوراک به‌صورت ناپیوسته و هر ۱۲ ساعت با قطع هوای

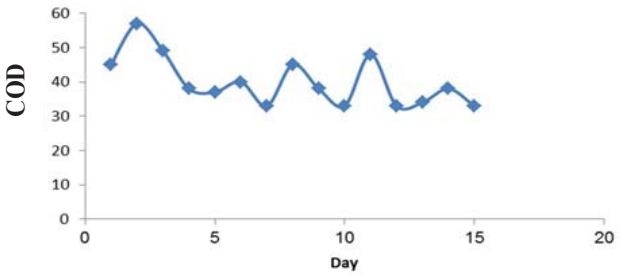
ورودی و اجازه ته‌نشینی میکروارگانیسم‌هایی که هنوز بر روی مواد بستر قرار نگرفته‌اند، به سیستم اضافه می‌شد. سپس با خالی‌کردن نیمی از راکتور و پر کردن آن با فاضلاب طبیعی تهیه شده و وصل کردن جریان هوا به اتمام می‌رسد. پس از تجمع توده بیولوژیک در اطراف مواد بستر به‌تدریج خوراک‌دهی از حالت ناپیوسته به حالا پیوسته تغییر یافت و خوراک از خوراک طبیعی به خوراک تهیه شده سنتزی تغییر حالت داد. این مرحله برای آماده‌سازی میکروارگانیسم‌ها و بیوفیلم کمی که تشکیل شده بود، به‌صورت تدریجی و در طول ۷ روز به‌طول انجامید. سپس فاضلاب سنتزی در چهار مرحله: ۱- راکتور غوطه‌ور رشد چسبیده به تنهایی ۲- همراه با ازناسیون به عنوان پیش‌تصفیه ۳- ازناسیون به‌عنوان تصفیه نهایی ۴- ازناسیون هم‌زمان در ورودی و خروجی سیستم بیولوژیکی انجام و شاخص‌های عملکرد مورد ارزیابی قرار گرفتند.

در این تحقیق، مقدار کاهش COD و آمونیوم فاضلاب اولیه به‌عنوان شاخص‌های عملکرد سیستم در هر مرحله درنظر گرفته شدند. اندازه‌گیری COD به‌روش رفلاکس بسته و اندازه‌گیری آمونیوم به‌روش نسلر با استفاده از دستگاه طیف‌سنج نوری Unico، مدل 2100 ساخت کشور آلمان براساس روش‌های استاندارد آب و فاضلاب براساس APHA (۱۹۸۵) انجام گرفت (Guzel-Seydim et al., 2004) همچنین اکسیژن محلول در هر مرحله به صورت دستگاهی با استفاده از الکترود اندازه‌گیری اکسیژن محلول، مدل Cyber Scan DO 300 انجام گرفت. برای تولید و تزریق ازن به سیستم از ازن ژنراتور مدل Ozomatic lab 802 ساخت کشور آلمان استفاده شد. ازن تولید شده از دستگاه با نرخ مورد نظر از طریق یک پخش‌کننده به پایین راکتور تزریق و پخش می‌شود. نرخ ازن استفاده شده ثابت و برابر g/hr ۱ بود. زمان ازناسیون نیز نیم ساعت درنظر گرفته شد. برای مهار کردن ازن موجود در هوای خروجی از راکتور، هوای خروجی به محلول ۲ درصد KI هدایت شد. هوای مورد نیاز دستگاه ازن توسط کپسول اکسیژن تامین شده و برای خشک کردن آن، هوا ابتدا از بستری از سیلیکاژل عبور داده شد. همچنین برای تنظیم میزان جریان هوای ورودی به دستگاه از یک رگلاتور دستی استفاده شد.

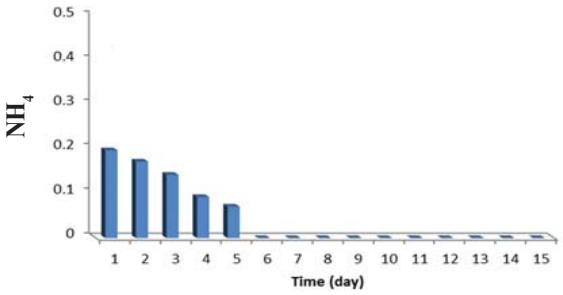
۳- نتایج و بحث

۳-۱- عملکرد راکتور بیولوژیکی

با توجه به این‌که این اولین مرحله تحقیق بررسی عملکرد تکی راکتور بیولوژیکی بود، بنابراین در این مرحله عملکرد راکتور غوطه‌ور رشد چسبیده به‌تنهایی مورد بررسی قرار گرفت. زمان ماند هیدرولیکی ۵ ساعت و بار آلی ورودی به راکتور $Kg/m^3.d$ ۱/۴۴ و دبی هوای ورودی به راکتور L/min ۶ درنظر گرفته شده است. در شکل (۲-الف و ۲-ب) به‌ترتیب تغییرات COD و آمونیوم در طول زمان راه‌اندازی آمده است. در تمامی روزهای این مرحله مقدار DO همواره بالاتر از ۴ بود. بنابراین می‌توان بیان کرد که هیچ محدودیتی در اکسیژن وجود ندارد. pH نیز نسبت به ورودی کاهش یافته است و این کاهش دلیلی بر انجام نیتریفیکاسیون است. میزان حذف بار آلی بر اساس داده‌های ۴ روز انتهایی مرحله اول ۸۹٪ به‌دست آمد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند در داده‌های COD روز ۸ و ۱۱ اختلالاتی در هوادهی و خوراک‌دهی به راکتور رخ داد که منجر به داشتن اختلاف این داده‌ها با دیگر داده‌ها شد.



(الف)



(ب)

شکل ۲- عملکرد راکتور بیولوژیکی براساس غلظت خروجی پساب؛ الف) COD و ب) آمونیوم برحسب mg/L

۳-۲- عملکرد راکتور بیولوژیکی همراه با ازناسیون به عنوان پیش‌تصفیه

در این مرحله تمامی شرایط شبیه مرحله اول می‌باشد و فقط فاضلاب سنتزی قبل از ورود به بیوراکتور به‌مدت نیم ساعت تحت ازناسیون قرار گرفته است. حجم فاضلابی که تحت ازناسیون قرار گرفته ۹ لیتر بوده که با توجه به مقدار HRT، هر ۸ ساعت یک‌بار ازناسیون انجام گرفت و نمونه‌برداری از خروجی بیوراکتور انجام گرفت. نتایج عملکرد سیستم در شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند براساس داده‌های به‌دست آمده از ۴ روز آخر میزان میانگین بازده حذف بار آلی ۹۴٪ است. در واقع استفاده از ازن به‌عنوان پیش‌تصفیه راندمان حذف COD را به‌صورت محسوسی افزایش داده است. میزان حذف نیتروژن همانند مرحله قبل کامل است و بیوراکتور به‌تنهایی توانایی حذف کامل آمونیوم را دارد و در واقع نیتریفیکاسیون بطور کامل انجام گرفته است.

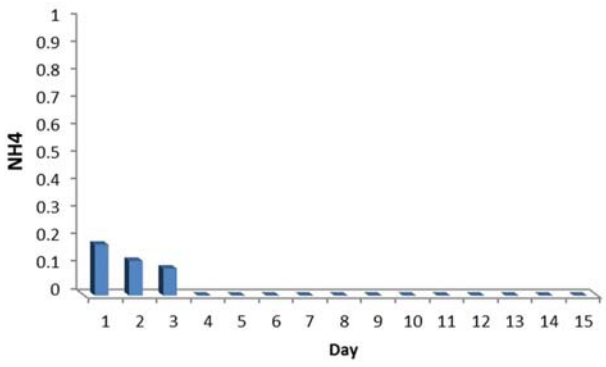
۳-۳- عملکرد راکتور بیولوژیکی همراه با ازناسیون به‌عنوان پس‌تصفیه

در این مرحله نیز تمامی شرایط شبیه مراحل قبل بوده با این تفاوت که فقط خروجی بیوراکتور در حجم ۹ لیتر به‌مدت نیم ساعت تحت ازناسیون قرار گرفت و نمونه‌برداری از خروجی ازن راکتور انجام شد. نتایج عملکرد سیستم در شکل ۴ آورده شده است. در این مرحله با تزریق ازن در خروجی تصفیه بیولوژیکی بازده مقداری بیشتر از مراحل قبل شده و براساس داده‌های به‌دست آمده از ۴ روز آخر میزان میانگین بازده حذف بار آلی ۹۷٪ به‌دست آمد. در واقع استفاده از ازن به‌عنوان تصفیه نهایی توانسته راندمان حذف COD را حتی نسبت به مرحله دوم افزایش دهد. نتایج به‌دست آمده از تحلیل آمونیوم نیز شبیه مراحل قبلی است و تفاوت در این است که از همان روز اول بیوراکتور به‌تنهایی توانست نیتروژن را به طور کامل حذف کند.

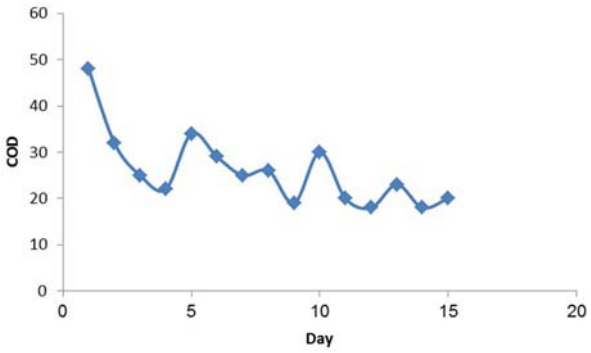
۳-۴- عملکرد راکتور بیولوژیکی همراه با ازناسیون هم‌زمان در ورودی و خروجی

در این مرحله روش مراحل دوم و سوم به‌طور هم‌زمان و با یک‌بار استفاده از ازن انجام شد. برای این منظور ابتدا خروجی از بیوراکتور را تحت ازناسیون قرار داده و خروجی فاز گاز آن به فاضلاب ورودی به بیوراکتور وصل شد. در این مرحله فاضلاب ورودی به بیوراکتور در حجم ۹/۵ لیتر و خروجی از بیوراکتور در حجم ۴/۵ لیتر تحت ازناسیون قرار داده شد. برای این منظور، یک راکتور جدید به سیستم اضافه شد. این راکتور از جنس پلکسی‌گلاس با حجم ۶ لیتر بود که ازن از پایین وارد راکتور شده و خروجی فاز گاز آن به راکتور ۹/۵ لیتری که حاوی فاضلاب ورودی است وصل شد. ازناسیون شبیه مراحل قبل به‌مدت نیم ساعت انجام شد. نمونه‌برداری نیز از خروجی راکتور ۴/۵ لیتری انجام شد. نتایج عملکرد سیستم در شکل ۵ آورده شده است. در این مرحله براساس داده‌های بدست آمده از ۴ روز آخر میزان میانگین بازده حذف بار آلی حدود ۹۸٪ به‌دست آمد که تقریباً شبیه مرحله قبل است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل آمونیوم نیز شبیه مرحله سوم بود.

بر این اساس، نتایج نشان داد که تقریباً در مورد حذف



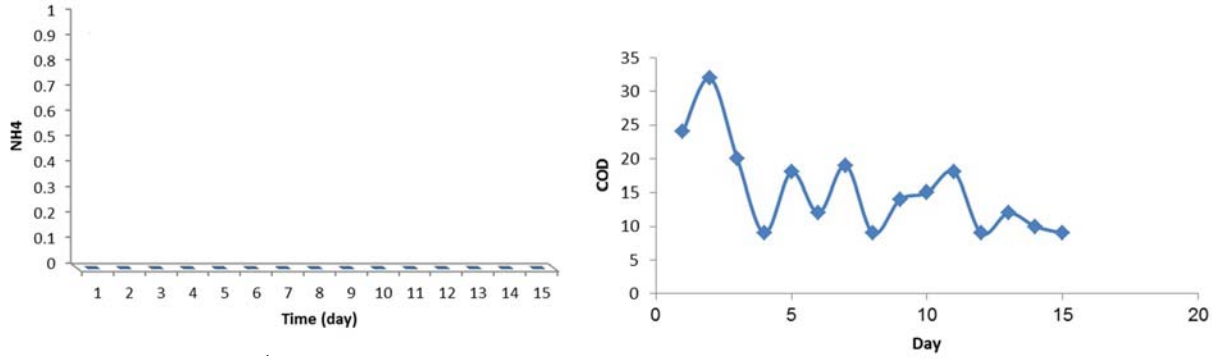
(ب)



(الف)

شکل ۳- عملکرد راکتور بیولوژیکی همراه با ازناسیون به عنوان پیش تصفیه بر اساس غلظت خروجی پساب؛

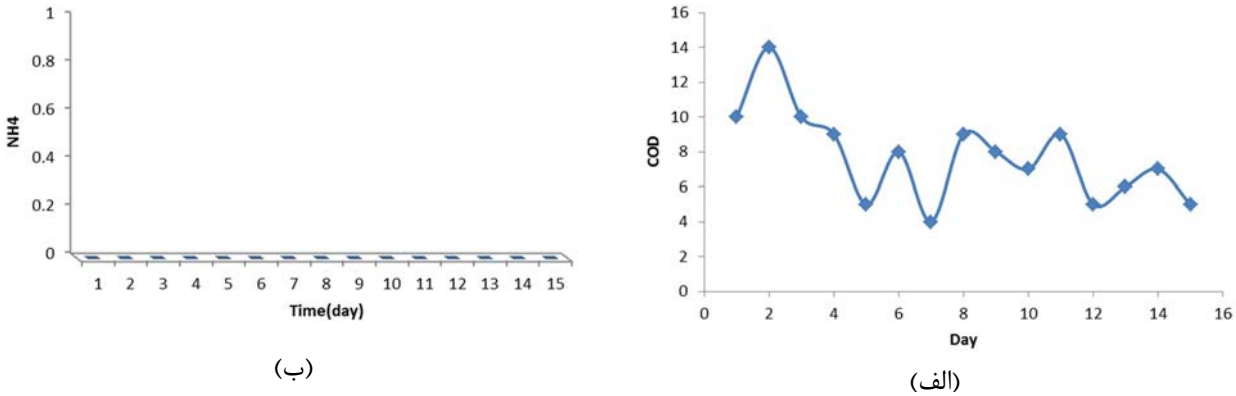
الف) COD و ب) آمونیوم برحسب mg/L



(ب) (الف)

شکل ۴- عملکرد راکتور بیولوژیکی همراه با ازناسیون در مرحله پس از تصفیه بر اساس غلظت خروجی پساب؛
الف) COD و ب) آمونیوم بر حسب mg/L

نیتروژن از فاضلاب، سیستم بیولوژیکی به‌تنهایی کافی بوده و نیازی به ازناسیون احساس نمی‌شود. اما در مورد حذف COD تفاوت در بازده مراحل وجود دارد. برای مطالعه دقیق‌تر این موضوع نتایج هر چهار مرحله از لحاظ حذف COD با هم مقایسه و از تحلیل آماری به‌روش T-TEST برای سنجش اختلاف داده‌ها استفاده شد (Beltran-Heredia et al., 2000). در شکل ۶ مقادیر COD خروجی و مقدار p برای هر دو ارائه شده‌اند. براساس روش مذکور چنانچه p مربوط به دو مرحله کوچک‌تر از ۰/۰۵ شد می‌توان بیان داشت که اختلاف داده‌ها معنادار است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند اختلاف داده‌های مراحل مختلف در یک مقایسه دوبه‌دو معنادار است. بنابراین می‌توان بیان داشت که استفاده از ازن در ترکیب با یک سیستم بیولوژیکی می‌تواند بازده حذف را ارتقاء بخشیده و به‌خصوص چنان‌چه به‌عنوان تصفیه نهایی پس از سیستم بیولوژیکی به‌کار رود می‌تواند یک راه‌کار مناسب برای حذف کامل ترکیبات آلی از یک فاضلاب محسوب می‌شود. در این میان آرایش‌های مختلف سیستم در افزایش یا کاهش مقدار بازده سیستم در حذف ترکیبات آلی تا حدی تاثیرگذار است، به این‌صورت که استفاده از ازناسیون در مرحله قبل و بعد از فرآیند بیولوژیکی به‌دلیل افزایش میزان اکسیداسیون ترکیبات آلی بالاترین بازده را دارد. در رتبه بعد بالاترین بازده مربوط به زمانی است که ازن به‌عنوان اکسیدکننده نهایی، بعد از مرحله بیولوژیکی استفاده شود. البته در مورد اخیر اختلاف حذف چندان با روش قبلی متفاوت نیست. در نهایت چنان‌چه از ازن به عنوان پیش‌تصفیه استفاده شود، بازده پایین خواهد بود. در مورد اخیر شاید تشکیل محصولات جانبی مقاوم به تجزیه دلیل



(ب) (الف)

شکل ۵- عملکرد راکتور بیولوژیکی همراه با ازناسیون قبل و بعد از سیستم بیولوژیکی براساس غلظت خروجی پساب؛
الف) COD و ب) آمونیوم برحسب mg/L

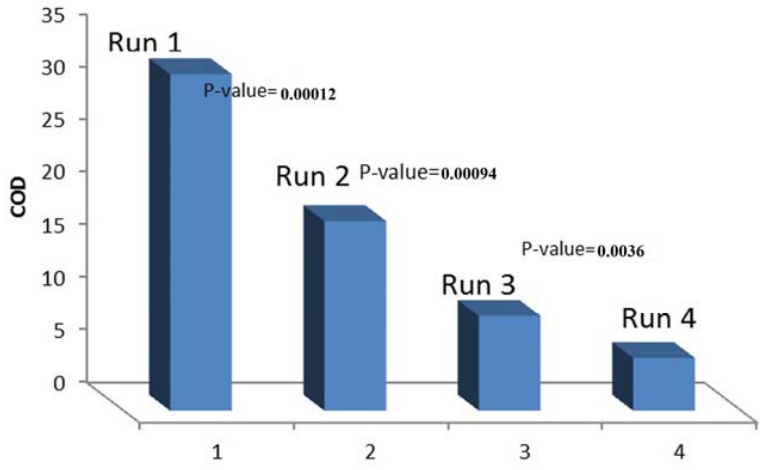
این امر باشد که در مرحله اکسیداسیون بیولوژیکی قابل تجزیه نیستند (Wert et al., 2007). در کل با توجه به نتایج به‌دست آمده باید علاوه‌بر ارزیابی اقتصادی هرکدام از روش‌ها، در مورد تاثیر نوع مواد آلی موجود در فاضلاب نیز تحقیقات بیشتری انجام گیرد. در جدول ۲ مقایسه نتایج خلاصه شده برخی از تحقیقات در ارتباط با فرآیند ترکیبی با نتیجه تحقیق حاضر ارائه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد یک راکتور بیولوژیکی در ترکیب با فرآیند ازناسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب ازناسیون با راکتور بیولوژیک غوطه‌ور رشد چسبیده هوازی برای استفاده در سیستم‌های تصفیه فاضلاب مناسب است و با توجه به انعطاف‌پذیری که راکتور بیولوژیک غوطه‌ور رشد چسبیده هوازی در مقابل شوک‌های ناشی از تغییرات بار آلی ورودی به تصفیه‌خانه دارد، می‌تواند عملکرد مناسبی را نشان دهد و یک روش کاملاً سازگار و مناسب است. در شرایط کاملا یکسان از نظر مقدار COD و آمونیوم ورودی و همچنین نرخ هوادهی ثابت و دبی ثابت فاضلاب ورودی به بیوراکتور، می‌توان بیان داشت که استفاده از ازن در کنار سیستم بیولوژیکی علاوه بر افزایش راندمان حذف می‌تواند از نظر میکروبی نیز خروجی سیستم را در حد مناسبی قرار دهد.

جدول ۲- مقایسه نتایج استفاده از فرآیندهای ترکیبی در تصفیه فاضلاب‌ها و تحقیق حاضر

نوع فاضلاب	COD ورودی (mg/L)	فرآیند ترکیبی	غلظت ازن (mg/L)	زمان ماند هیدرولیکی (دقیقه)	زمان ازناسیون (دقیقه)	حجم ازناسیون (لیتر)	pH	درصد متوسط بازده حذف	مرجع
سنتزی	۳۰۰	ازناسیون- بیولوژیکی (غوطه‌ور رشد چسبیده)	۱ g/h	۳۰۰	۳۰	۹	۸/۷	۹۴	این تحقیق
ککسازی	۱۸۰۰	ازناسیون- بیولوژیکی (فیلتر هوادهی)	۶۰	۱۲۰	۵۰	۷/۵	۷/۵	۵۰	Zhang et al. (2014)
تولید رزین	۱۱۷-۶۸۵۱	ازناسیون- بیولوژیکی (لجن فعال)	۱۳	-	۵۰	۱/۶	۸/۷	۹۰	Aparicio et al. (2007)
خانگی	۵۳	ازناسیون- بیولوژیکی (فیلتر هوادهی)	۱۰	-	۴	۱/۲	۷/۸	۵۸	Wang et al. (2008)



شکل ۶- مقایسه متوسط COD خروجی چهار روز آخر هر مرحله با مراحل دیگر

۵- مراجع

American Public Health Association (APHA) (1985), Standard methods for the examination of water and wastewater, 16th Edition, University of California, USA, 1268 p.

Aparicio, M.A., Eiroa, M., Kennes, C., and Veiga, M.C., (2007), "Combined post-ozonation and biological treatment of recalcitrant wastewater from a resin-producing factory", *Journal of Hazardous Materials*, 143(1-2), 285-290.

Beltran-Heredia, J., Torregrosa, J., Dominguez, J.R., and Garcia, J., (2000), "Aerobic biological treatment of black table olive washing wastewaters: Effect of an ozonation stage", *Process Biochemistry*, 35, 1183-119.

Clesceri, L.S., Eaton, A.D., Greenberg. A.E., and Franson, M.A.H., (1998), *Standard methods for the examination of water and wastewater*, American Water Works Association and W.E. Federation.

Cohen, Y., (2001), "Biofiltration–the treatment of fluids by microorganisms immobilized into the filter bedding material: A review", *Bioresource Technology*, 77(3), 257-274.

Guzel-Seydim, Z.B., Greene, A.K., and Seydim, A.C., (2004), "Use of ozone in the food industry", *LWT-Food Science and Technology*, 37(4), 453-460.

Heidemarie S., Manfred, C., Gans, O., and Kreuzinger, N., (2010), "Micropollutant removal during biological wastewater treatment and a subsequent ozonation step", *Environmental Pollution*, 158, 1399-1404.

Izanloo, H., Mesdaghinia, A., Nabizadeh, R., Nasseri, S., Naddafi, K., Mahvi, A.H., and Nazmara, Sh., (2006), "Effect of organic loading on the performance of aerated submerged fixed-film 85 reactor (ASFFR) for crude oil-containing wastewater treatment", *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 3(2) 85-90.

Jou, C.-J.G., and Huang, G.C., (2003), "A pilot study for oil refinery wastewater treatment using a fixed-film bioreactor", *Advances in Environmental Research*, 7(2), 463-469.

Klauson, D., Kivi A., Kattel, K., Viisimaa, M., Bolobajev, J., Velling, S., Goi, A., Tenno, T., and Tenno, M., (2015), "Combined processes for wastewater purification: treatment of a typical landfill leachate with a combination of chemical and biological oxidation processes", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 90(8), 1527-1536.

Oller, I., Malato, S., and Sánchez-Pérez, J., (2011), "Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for wastewater decontamination - A review", *Science of the Total Environment*, 409(20), 4141-4166.

Schaar, H., Clara, M., Gans, O., and Kreuzinger, N., (2010), "Micropollutant removal during biological wastewater treatment and a subsequent ozonation step", *Environmental Pollution,* 158(5), 1399-1404.

Ternes, T.A., Herrmanna, N., McDowell, D., Ried, A., Kampmann, M., and Teiser, B., (2003), "Ozonation: A tool for removal of pharmaceuticals, contrast media and musk fragrances from wastewater?", *Water Research*, 37, 1976-1982.

Van Haandel, A.C., and Lettinga, G., (1994), *An aerobic sewage treatment: A practical guide for regions with a hot climate*, John Wiley & Sons.

Wang, S., Ma, J., Liu, B., Jiang, Y., and Zhang, H., (2008), "Degradation characteristics of secondary effluent of domestic wastewater by combined process of ozonation and biofiltration", *Journal of Hazardous Materials*, 150(1), 109-114.

Wert, E.C., Rosario-Ortiz, F.L., Drury, D.D., and Snydera, S.A., (2007), "Formation of oxidation byproducts from ozonation of wastewater", *Water Research*, 41(7), 1481-1490.

Zhang, S., Zheng, J., and Chen, Z., (2014), "Combination of ozonation and biological aerated filter (BAF) for bio-treated coking wastewater", *Separation and Purification Technology*, 132, 610-615.