مجله‌ی علمی، پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی زنجان
دوره‌ی 17، شماره‌ی 68، پاییز ۱۳۸۸، صفحات ۲۱ تا ۳۴

بهینه‌سازی فرآیند حذف پروپیلن در یک راکتور لجن فعال متعارف به کمک روش تحلیل آزمایشات تاگوچی

سهند جرفی[۱]، دکتر روشنک رضایی‌کلانتری[۲]، امیررضا طلایی[۳]، محمدمهدی مهربانی[۴]، دکتر مهدی فرزادکیا[۵]

نویسنده‌ی مسئول: تهران، دانشگاه تربیت مدرس، گروه بهداشت محیط Sahand359@yahoo.com

دریافت: ۸۷/۱۰/۳ پذیرش: ۸۸/۲/۱۳

چکیده

زمینه و هدف؛ *مواجهه با پروپیلن گلیکول می‌تواند منجر به خطرات بهداشتی فراوانی نظیر عارضه‌های خونی، پوستی و کلیوی شود. در این مطالعه، تصفیه‌ی فاضلاب مصنوعی حاوی پروپیلن‌گلیکول در یک راکتور لجن فعال متعارف با جریان پیوسته مورد بررسی قرار گرفت و نهایتاً شرایط رشد بهینه‌ی میکروارگانیسم‌های دخیل در تجزیه‌ی بیولوژیکی با کمک روش تاگوچی بررسی شد.*

روش بررسی؛ *پس از سازگاری میکروارگانیسم‌های منتقله از یک تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب شهری با غلظت‌های مختلف پروپیلن گلیکول در یک راکتور لجن فعال متعارف، شرایط رشد بهینه‌ی میکروارگانیزم‌ها و راهبری سیستم به لحاظ ۴ پارامتر pH، COD ورودی، نوع منبع نیتروژن و درصد شوری در سه سطح به کمک روش تاگوچی تعیین شد.*

یافته‌ها؛ *بازده حذف COD در راکتور لجن فعال متعارف در پنج غلظت ۴۰۰ ، ۷۰۰ ، ۹۰۰ ، ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب ۹۸، ۹۵، ۹۵، ۹۰ و ۸۵ درصد بود. بهینه‌سازی فرآیند به وسیله‌ی روش تاگوچی نشان داد که عوامل بهینه‌ی رشد میکروارگانیزم‌ها و بهره برداری سیستم در تجزیه‌ی پروپیلن گلیکول شامل منبع نیتروژن اوره، pH معادل ۸، شوری برابر ۸ درصد و COD ورودی ۱۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب ۴۱، ۲۵، ۱۷/۱۱ و ۱۶/۱۴ درصد بوده‌اند.*

نتیجه‌گیری؛ *با توجه به نتایج به دست آمده از این مطالعه می‌توان اظهار کرد که با کمک روش‌های طراحی آزمایشگاه‌ها به سادگی می‌توان شرایط بهینه‌ی فرآیندهای بیولوژیکی را تعیین نمود و کارائی سیستم‌های تصفیه را افزایش داد.*

واژگان کلیدی؛ پروپیلن گلیکول، لجن فعال متعارف، تصفیه‌ی فاضلاب، روش تاگوچی

مقدمه

گسترش روز افزون صنایع مختلف منجر به تولید پساب‌های صنعتی با سمیت زیاد برای محیط زیست شده است. حذف ترکیبات خطرناک موجود در خروجی پساب صنایع گوناگون از نیازهای امروزی بشر می‌باشد. این امر لزوم

۱- دانشجوی دکترای مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دکترای عمران محیط زیست، استادیار دانشگاه علوم پزشکی ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست و عضو هیئت علمی موسسه آموزش عالی جامی

۴- کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، شرکت شهرک‌های صنعتی استان فارس

۵- دکترای تخصصی بهداشت محیط، دانشیار دانشگاه علوم پزشکی ایران

تحقیق در سیستم‌های تصفیه‌ی مؤثر را کاملاً روشن می‌سازد. پروپیلن گلیکول یکی از محصولات تولیدی در صنایع پتروشیمی بوده که به همراه مشتقات خود به شکل گسترده‌ای در صنایع تولید سورفکتانت‌ها، صنایع دارویی، آرایشی و بهداشتی، صنایع تولید مواد شیمیایی، صنایع موادغذایی و پس از تبدیل به پلی‌پروپیلن گلیکول در تولید پلی یورتان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و از طریق پساب تولیدی این صنایع وارد محیط زیست می‌شود (۳-۱). این ترکیب COD بسیار بالایی را در منابع پذیرنده ایجاد می‌کند (۵و۴). همچنین این ماده یکی از ترکیبات اصلی تولید مایعات ضدیخ است که به شکل گسترده‌ای در فرودگاه‌ها به کار می‌رود و از این طریق منجر به آلودگی بسیار شدید خاک‌های نواحی مجاور فرودگاه‌ها شده، یا در مقادیر زیاد به آب‌های زیرزمینی راه می‌یابد (۶).

بهینه‌سازی فرآیند تجزیه‌ی بیولوژیک ترکیبات آلی در پساب‌های صنعتی بسیار مهم است، به گونه‌ای که با تغییرات در شرایط محیطی بتوان درصد حذف ترکیبات آلاینده را افزایش داد. روش‌های گوناگونی برای بهینه‌سازی شرایط رشد میکروارگانیسم‌ها توسط محققین گوناگون به کار گرفته شده است. امروزه طراحی آزمایش‌ها برای به‌دست آوردن شرایط بهینه در مطالعات گوناگون کاربرد زیادی یافته است (۸و۷). از بین روش‌های مختلف طراحی آزمایش‌ها روش تاگوچی سال‌هاست که در صنایع الکترونیک و مکانیک و اخیراً نیز در مطالعات بیولوژیک کاربردهای فراوانی یافته است. در تحقیقی که ایزن چات و همکاران برروی تصفیه‌ی فاضلاب داشتند، با استفاده از روش تاگوچی توانستند به روش‌ها و راهکارهای جدیدی در ارتباط با کنترل کیفی فاضلاب دست یابند (۹). همچنین در تحقیق دیگری که توسط هوانگ و همکاران صورت گرفت، برای الگوسازی و تغییر آن از روش تاگوچی استفاده شد (۱۰). روش تاگوچی توسط جنچی تاگوچی پیشنهاد شد و شامل روش طراحی آزمایش‌ها برای تعیین میزان تأثیر عوامل بر پاسخ و به دست آوردن شرایط بهینه‌ی سیستم می‌باشد (۱۱). محققین مختلفی تجزیه‌ی زیستی ترکیبات گلیکول را بررسی کرده‌اند. اوانس ودیوید (۱۲) مطالعه‌ای را بر روی تجزیه‌ی بیولوژیک منو، دی و تری اتیلن گلیکول در آب رودخانه و در شرایط کنترل شده‌ی آزمایشگاهی انجام دادند. آن‌ها توانستند در مدت ۳ روز و با دمای ۲۰ درجه‌ی سانتیگراد کل منواتیلن گلیکول ورودی را در شرایط آزمایشگاهی حذف نمایند، ولی با توجه به دمای معمول رودخانه که در حدود ۸ درجه‌ی سانتی‌گراد بود، تجزیه‌ی کامل منو اتیلن گلیکول در مدتی کمتر از ۸ روز امکان پذیر نشد. زگولا و همکارانش (۲) مقایسه‌ای بین میزان حذف پروپیلن گلیکول و اتیلن گلیکول انجام دادند. آنها موفق به حذف مقادیر بسیار زیادی از این ترکیبات در محیط‌های آبی در طی آزمایش‌های خود شدند. این محققین در مطالعه‌ای دیگر (۵) اکسیداسیون بیولوژیکی تری پروپیلن گلیکول را در یک سیستم لجن فعال نیز انجام دادند. آن‌ها دریافتند که این ترکیب در غلظت بیش از ۱۰ میلی‌گرم در لیتر در سیستم‌های زیستی که در معرض این ترکیب نبوده‌اند، به شدت سمی است. دبورا و همکارانش (۱۳) بررسی معدنی‌سازی پروپیلن گلیکول را در خاک انجام دادند. آن‌ها معدنی سازی این ترکیب را در دماهای مابین ۷ الی ۲۲ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام دادند و توانستند مقادیر زیادی از این ترکیب را در خاک کاهش دهند.

هدف از این مطالعه تعیین شرایط بهینه‌ی حذف بیولوژیکی پروپیلن گلیکول در یک راکتور لجن فعال متعارف است که یکی از متداول‌ترین انواع سیستم‌های تصفیه‌ی فاضلاب در سطح جهان می‌باشد. این سیستم دارای مزایایی همچون بوی کم، عدم تجمع حشرات و راندمان بالا می‌باشد (۱۴). در این تحقیق ابتدا با مطالعه‌ی عمیق بر روی فرآیند حذف بیولوژیکی پروپیلن گلیکول و بررسی تحقیقات قبلی، چهار عامل pH، نوع منبع نیتروژن، میزان اکسیژن خواهی شیمیایی

و ورودی و درصد شوری به عنوان عوامل مؤثر احتمالی بر میزان رشد میکروارگانیسم‌ها تعیین گردید. سپس با سازگارسازی میکروارگانیسم‌ها در راکتور زیستی، بهترین سطوح عوامل انتخاب شده به کمک روش تاگوچی به‌دست آمد و درصد تأثیر هریک از آنها در محدوده‌ی انتخاب شده تعیین گردید.

روش بررسی

ساختار راکتور زیستی: راکتور مورد استفاده در این مطالعه‌ی مداخله‌ای تحلیلی یک محفظه‌ی استوانه‌ای شکل از جنس پلاکسی‌گلاس با حجم کل ۶ لیتر بود. قطر این راکتور ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۳۴ سانتی‌متر بود. خروجی سیستم در ارتفاع ۲۸ سانتی‌متری قرار گرفته بود که حجم مؤثری برابر با ۵ لیتر ایجاد می‌کرد. ۵/۵ سانتی‌متر از ارتفاع کل راکتور نیز به عنوان فضای آزاد در بالای راکتور در نظر گرفته شده بود. هوای مورد نیاز جهت تأمین اکسیژن محلول و اختلاط کافی در این سیستم با کمک یک کمپرسور تأمین می‌گردید. حجم هوای ورودی نیز از طریق یک فلومتر اندازه‌گیری شده، با کمک یک شیر دبی قابل تنظیم بود. برای جداسازی لخته‌های میکروبی موجود در سیستم از پساب خروجی و بازگرداندن بخشی از آن به سیستم از یک مخزن ته‌نشینی استفاده گردید. این مخزن به شکل مکعب بوده، دارای حجم موثر ۲ لیتر بود. تغذیه‌ی سیستم و برگشت لجن از مخزن ته‌نشینی توسط دو پمپ پریستالتیک صورت می‌گرفت. این سیستم در دمای اتاق (۲۰تا۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) و به‌صورت پیوسته مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

تهیه‌ی فاضلاب مصنوعی: برای تهیه‌ی فاضلاب یک محیط معدنی به صورت ۰/۱ گرم در لیتر $MgSO_4$، ۰/۵ گرم در لیتر KH_2PO_4، ۰/۰۱ گرم در لیتر $CaCl_2.2H_2O$، ۰/۰۰۱ گرم در لیتر $FeSO_4$، ۱ گرم در لیتر NH_4Cl، ۰/۵ گرم در لیتر K_2HPO_4، و ۰/۰۰۱ گرم در لیتر $MnSO_4$، در آب مقطر تهیه گردید. pH نمونه به کمک محلول هیدروکسید سدیم بر روی ۷±۰/۵ تنظیم شد. منبع کربن مورد نیاز این سیستم از طریق اضافه نمودن مقدار مشخصی گلوکز (در ابتدای راه‌اندازی) و پروپیلن گلیکول به ازای هر لیتر فاضلاب تولیدی تأمین گردید. کلیه‌ی موادغذایی موجود در فاضلاب مصنوعی تولیدی تا قبل از مرحله‌ی بهینه‌سازی، کاملاً ثابت بود.

راه‌اندازی راکتور: به منظور راه‌اندازی راکتور و تامین میکروارگانیسم‌های مورد نیاز آن، ۵ لیتر لجن از خط برگشتی تصفیه خانه‌ی فاضلاب شهرک غرب تهران برداشت شد. این مخلوط به کمک کمپرسور به مدت ۲ هفته به صورت ناپیوسته مورد هوادهی قرار گرفت. در ابتدا برای راه‌اندازی سیستم از گلوکز که یک منبع کربن مناسب برای میکروارگانیسم‌ها می‌باشد، استفاده گردید و کم‌کم از میزان آن کاسته شده، به میزان پروپیلن گلیکول افزوده شد. در هفته‌ی اول راه‌اندازی سیستم COD فاضلاب ورودی ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شد. بدین‌منظور ۳۵۰ میلی‌گرم در لیتر از COD فاضلاب با استفاده از گلوکز و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر آن با استفاده از پروپیلن گلیکول تامین گردید. حجم هوای ورودی برای رسیدن به اکسیژن محلول کافی (۱ تا۲ میلی‌گرم در لیتر) و اختلاط مناسب در کل سیستم تنظیم گردید. روزانه پس از قطع هوادهی به مدت ۳۰ دقیقه و ته‌نشینی توده‌ی زیستی ۱/۵ لیتر از مایع زلال رویین از سیستم خارج و ۱/۶ لیتر فاضلاب مصنوعی ساخته شده، به سیستم اضافه گردید. ۱۰۰ میلی‌لیتر فاضلاب اضافه، مربوط به حجمی از فاضلاب در نظر گرفته شد که در طی هوادهی از سیستم تبخیر گردید. با توجه به نتایج پایش COD خروجی و به موازات افزایش قابلیت سیستم در حذف COD ورودی اقدام به کاهش نسبت گلوکز به پروپیلن نموده، از هفته‌ی پنجم سوبسترای ورودی، فقط از پروپیلن گلیکول تشکیل شده بود. پس از گذشت شش هفته از آغاز راه اندازی سیستم، جریان را

پیوسته نموده، تا پایان ۱۶۳ روز راهبری راکتور و انجام آزمایشات، راکتور به صورت پیوسته، راهبری شد. راکتور در مرحله‌ی راهبری، پیوسته در زمان ماند هیدرولیکی ثابت، ۶ ساعت مورد بهره برداری قرار گرفت. در این مطالعه راکتور در دمای معمول اتاق (۲۰تا ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) مورد بهره‌برداری و مطالعه قرار گرفت. در پایان مرحله‌ی راه‌اندازی، میزان COD ورودی به سیستم ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر و تنها منبع کربن میکروارگانیسم‌ها پروپیلن گلیکول بود.

سازگارسازی میکروارگانیسم‌ها: پس از راه‌اندازی راکتور برای دستیابی به میکروارگانیسم‌های سازگار با مقادیر بالای پروپیلن گلیکول به ترتیب از مقادیر COD ورودی ۴۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰ و در نهایت ۱۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر COD استفاده گردید. سیستم در هر مرحله تا زمان رسیدن به COD خروجی پایدار مورد پایش قرار می‌گرفت. حدوداً هر مرحله، سه تا چهار هفته به طول انجامید. کل این مراحل در ۱۶۳ روز انجام شد. در طول این مدت pH محلول به کمک هیدروکسیدسدیم و اسیدهیدروکلریک بر روی ۷ تنظیم می‌گردید.

طراحی آزمایش‌ها: برای طراحی تعداد آزمایش‌ها سه روش وجود دارد: روش یک فاکتور در یک زمان (One Factor at Time)، روش فاکتوریل کامل (Full Factorial) و روش کسری از یک فاکتوریل کامل (Fraction of Full Factorial)، در روش اول یک فاکتور تغییر کرده و سایر فاکتورها ثابت نگه داشته می‌شود و این عمل برای بقیه‌ی فاکتورها نیز تکرار می‌شود. به دلیل عدم بررسی اثر متقابل بین متغیرها این روش مناسب نیست. در روش فاکتوریل کامل تمام حالات ممکن بین متغیرها بررسی می‌شود که روش دقیقی است ولی به دلیل صرف انرژی، زمان و هزینه‌ی زیاد توصیه نمی‌شود (۱۵). بنابراین روش سوم انتخاب شد که در آن تعدادی از ترکیب‌های ممکن بین متغیرها انتخاب شده، با ارزیابی آماری پاسخ‌ها، بهترین شرایط تعیین شد. برای بررسی تأثیر عوامل و تعیین شرایط بهینه‌ی رشد میکروارگانیسم‌ها، چهار عامل در سه سطح مختلف در نظر گرفته شد. جدول ۱ مقادیر هر یک از این عوامل را با نمادگذاری در سه سطح ۱، ۲، و ۳ نشان می‌دهد. سطوح مورد نظر با توجه به محدوده‌ی عملیاتی متداول آن‌ها که در منابع مختلف ذکر گردیده، انتخاب شد. به منظور طراحی آزمایش‌ها از نرم‌افزار Qualitek-4 Nutek Inc. استفاده گردید. آزمایش‌های طراحی شده به صورت یک جدول با ۹ آزمایش (L_9) در جدول ۲ نشان داده شده است (۱۶و ۷).

جدول ۱: معرفی عوامل و سطوح آن‌ها

عامل	سطوح		
	پایین (۱)	متوسط (۲)	بالا (۳)
pH	۶	۷	۸
نوع منبع نیتروژن	$NaNO_3$	NH_4Cl	$CO(NH_3)_2$
COD ورودی (میلی‌گرم در لیتر)	۴۰۰	۹۰۰	۱۳۰۰
درصد شوری	۴	۶	۸

برای انجام آزمایش‌ها از ۹ ارلن مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر فاضلاب مصنوعی و ۲۰ میلی‌لیتر از مایع مخلوط موجود در راکتور استفاده گردید. میزان منابع مختلف نیتروژن به کار گرفته شده در این مطالعه دقیقاً برای رسیدن به نسبت CبهN برابر ۱۰۰به۵ محاسبه شد (۱۴). جهت افزایش شوری محلول از NaCl استفاده شد. ۳ ارلن‌مایر دیگر نیز پس از استریل شدن به کمک اتوکلاو با مقادیر COD ۴۰۰، ۹۰۰ و ۱۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر به عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شد. در نهایت کلیه‌ی ارلن مایرها بر روی یک شیکر با دور ۱۶۰ دور در دقیقه به مدت ۴۰ ساعت قرار گرفتند. پس از گذشت مدت زمان فوق COD کلیه نمونه‌ها پس از صاف شدن با کاغذ صافی، مورد سنجش قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها مورد ارزیابی آماری قرار گرفت.

روش‌های اندازه‌گیری: در این مطالعه برای سنجش میزان شوری از یک دستگاه شوری سنج ساخت کارخانه‌ی آتاگو (Atago) مدل S/Mill-E با محدوده‌ی قابل تنظیم صفر الی ۱۰۰ درصد استفاده گردید. اندازه‌گیری میزان اکسیژن محلول به کمک روش وینکلر و سنجش COD به روش تقطیر برگشتی و بنابر روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب انجام شد (۱۷). اندازه‌گیری pH نیز توسط pH متر دیجیتال (Hack) صورت پذیرفت.

یافته‌ها

راه‌اندازی راکتور و سازگارسازی میکروارگانیسم‌ها: در بخش اول این مطالعه که ۱۶۳ روز به طول انجامید راه‌اندازی سیستم و سازگارسازی میکروارگانیسم‌های موجود در راکتور با پروپیلن گلیکول انجام پذیرفت. درصد حذف COD در غلظت‌های COD ورودی ناشی از پروپیلن گلیکول به میزان ۴۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب ۹۸ (انحراف معیار= ۳/۳۹ ±)، ۹۵ (انحراف معیار= ۵/۷۱ ±)، ۹۵ (انحراف معیار= ۴/۶۹ ±)، ۹۰ (انحراف معیار= ۵/۰۷ ±) و ۸۵ (انحراف معیار= ۴/۸۲ ±) درصد بود که میانگین نتایج آن پس از رسیدن به شرایط پایداری در شکل ۲ نمایش داده شده است. در پایان ۱۶۳ روز راهبری سیستم در پنج بارگذاری مورد بررسی، میزان حذف COD در بالاترین بارگذاری برابر با ۸۵ درصد بود که در بهینه‌سازی میکروارگانیسم‌های موجود در این سیستم، با وجود رقیق سازی غلظت میکروارگانیسم‌ها در این آزمون به حدود ۲۰ درصد میزان اولیه، این کارائی در بهترین حالت در همان میزان ۸۵ درصد باقی ماند. بدیهی است با ایجاد شرایط بهینه در راکتور که دارای غلظت بالایی از میکروارگانیسم‌ها می‌باشد، می‌توان به درصد بالاتری از حذف پروپیلن گلیکول دست یافت. با افزایش غلظت COD ورودی، راندمان سیستم به تدریج کاسته شده است.

تابع پاسخ تبدیل‌یافته: پس از سازگارسازی میکروارگانیسم‌ها، برای بررسی تأثیر عوامل و تعیین شرایط بهینه‌ی رشد میکروارگانیسم‌ها آزمایش‌های دیگری انجام شد که نتایج حاصل از اندازه‌گیری درصد حذف COD خروجی با دوبار اندازه‌گیری در جدول ۲ گزارش گردیده است.

جدول ۲: جدول آزمایش‌های طراحی شده (به روش تاگوچی) و نتایج حاصل از اندازه‌گیری حذف COD

شماره آزمایش	درصد حذف COD		عوامل				S/N
	آزمون اول	آزمون دوم	درصد شوری	COD ورودی میلی‌گرم در لیتر	نوع منبع نیتروژن	PH	
۱	۵	۹	۲	۱	۱	۱	۱۵/۸۲۱
۲	۴۱	۳۶	۳	۲	۲	۱	۳۱/۶۵۴
۳	۸۵	۸۰	۱	۳	۳	۱	۳۸/۳۱۷
۴	۳۷	۳۳	۱	۲	۱	۲	۳۰/۸۳۸
۵	۶۳	۶۲	۲	۳	۲	۲	۳۵/۹۱۶
۶	۸۲	۷۹	۳	۱	۳	۲	۳۸/۱۱۱
۷	۶۵	۶۰	۳	۳	۱	۳	۳۵/۸۹۶
۸	۷۰	۶۶	۱	۱	۲	۳	۳۶/۶۳۸
۹	۶۴	۷۰	۲	۲	۳	۳	۳۶/۴۹۵

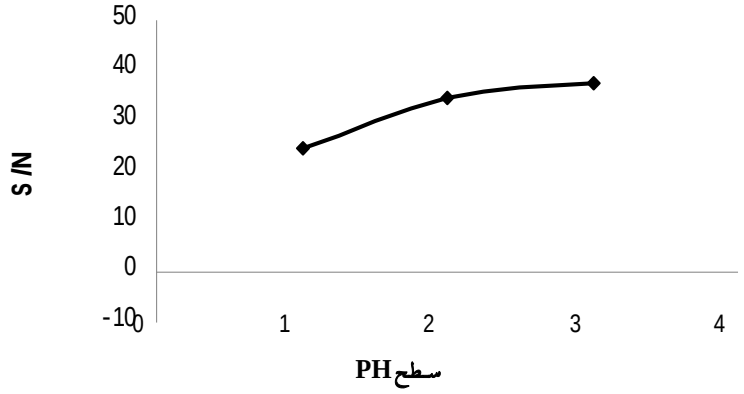
در روش تاگوچی برای تحلیل آماری و دقیق‌تر نتایج، از یک تابع پاسخ تبدیل‌یافته که به صورت نسبت علامت هر اثر (S) به اثرات ناشی از خطا (N) تعریف می‌گردد، استفاده می‌شود. مزیت استفاده از این پاسخ جدید در تحلیل آماری، نسبت به شکل اولیه‌ی پاسخ، مقایسه‌ی بزرگی اثرات ناشی از هر عامل اصلی با اثرات ناشی از عوامل خطا و اغتشاش در اندازه‌گیری است، که در نتیجه منجر به برداشت دقیق‌تری از تاثیر واقعی عوامل بر سیستم خواهد شد (۱۱). نحوه‌ی محاسبه‌ی نسبت S/N بسته به این که هدف چه نوع بهینه‌سازی باشد، متفاوت خواهد بود. از آنجا که در این مطالعه پاسخ درنظر گرفته شده درصد حذف COD می‌باشد، و بنابراین هدف بیشینه‌سازی پاسخ می‌باشد، نسبت S/N به صورت معادله (۱) محاسبه می‌گردد (۱۶و۱۱).

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{(1/y_1^2 + 1/y_2^2 + \Lambda + 1/y_n^2)}{n}$$

در این معادله y_n مقدار پاسخ اندازه‌گیری شده برای هر آزمایش در هر آزمون، و n تعداد تکرار آزمایش‌ها (در اینجا برابر با ۲) می‌باشد. مقادیر S/N محاسبه شده برای هر آزمایش، در جدول ۲ نشان داده شده‌است. هدف جدید در مسئله، بیشینه‌سازی این پاسخ می‌باشد.

تأثیر عوامل بر سیستم: میزان و نحوه‌ی تاثیر عوامل مختلف بر پاسخ تبدیل یافته سیستم (به صورت نسبت S/N) برای هر یک از عوامل در اینجا تحلیل شده است. لازم به تاکید است کلیه‌ی نتایج به‌دست آمده در محدوده‌ی سطوح در نظر گرفته شده، صادق است.

تأثیر pH محیط: نمودار ۱-الف تأثیر pH فاضلاب بر درصد حذف پروپیلن گلیکول را نشان می‌دهد. در واقع pH محیط یکی از عوامل مؤثر بر روی متابولیسم سلول‌ها و کارکرد آنزیم‌های آن‌ها می‌باشد. با توجه به این نمودار مشخص است که با افزایش pH، میزان رشد میکروارگانیسم‌ها و یا درصد حذف COD افزایش می‌یابد.



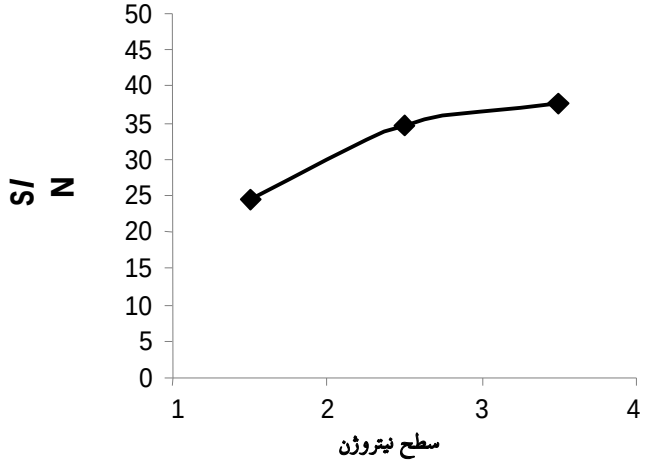
نمودار ۱-الف: مقدار pH راکتور بر درصد حذف پروپیلن گلیکول

سطوح pH ۱:۶ ۲:۷ ۳:۸

این تاثیر وقتی که pH از ۶ به ۷ تغییر می‌کند، بیشتر مشهود است. ظاهرا کارایی میکروارگانیسم‌ها در این سیستم در محیط اسیدی چندان بالا نیست. با توجه به نمودار ۱-الف تفاوت چندان محسوسی بین کارکرد سیستم در pH برابر با ۷ و pH

برابر با ۸ وجود ندارد. بنابراین می‌توان اظهار نمود که pH بهینه برای این سیستم در محدوده‌ی کاری ۷ الی ۸ قرار دارد. pH مناسب میکروارگانیسم‌ها در بیشتر مطالعات در محدوده‌ی خنثی می‌باشد، که با توجه به نزدیک بودن شرایط بهینه‌ی بدست آمده در این مطالعه به محدوده‌ی ۶/۵ الی ۷/۵ می‌توان به صحت این ادعا پی برد (۱۴). pH مناسب در بیشتر مطالعات قبلی نیز برای میکروارگانیسم‌های مختلف در همین محدوده بدست آمده است (۱۹و۱۸).

تأثیر منبع نیتروژن؛ نیتروژن عنصری ضروری برای رشد و متابولیسم میکروارگانیسم‌ها به حساب می‌آید و یکی از اساسی‌ترین عناصر موجود در آنزیم‌ها می‌باشد. در این مطالعه از سه ترکیب نیتروژن دار به عنوان منبع نیتروژن استفاده گردید. تاثیر نوع منبع نیتروژن در فاضلاب بر درصد حذف پروپیلن گلیکول در نمودار ۱-ب نشان داده شده است.

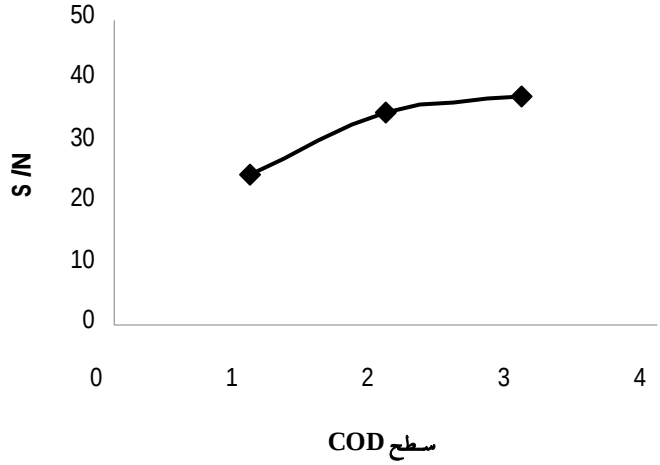


نمودار ۱-ب؛ تاثیر نوع منبع نیتروژن در فاضلاب بر درصد حذف پروپیلن گلیکول سطوح منبع نیتروژن؛
۱؛ $NaNO_3$ ۲؛ NH_4Cl ۳؛ $CO(NH_3)_2$

در بین این سه منبع، بالاترین پاسخ با استفاده از اوره بدست آمد. از آنجا که این ماده از لحاظ قیمت نیز نسبت به سایر منابع به کار گرفته شده در این مطالعه ارزان‌تر بود، لذا می‌توانست به عنوان منبع نیتروژن مناسب در نظر گرفته شود. اوره ترکیبی است که علاوه بر نیتروژن حاوی کربن نیز می‌باشد و میکروارگانیسم‌ها قادرند هر دو منبع کربن و نیتروژن خود را از آن تامین کنند. اگرچه اوره خود باعث افزایش میزان COD محیط نیز می‌گردد، با این حال میکروارگانیسم‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای هم قادر به حذف COD ناشی از اوره و هم پروپیلن گلیکول بوده‌اند. یکی از دلایل پاسخ بهتر سیستم در استفاده از اوره به عنوان منبع نیتروژن، می‌تواند به تجزیه‌پذیری بیشتر اوره نسبت به پروپیلن گلیکول نسبت داده شود. این ترکیب می‌تواند منجر به رشد سریع‌تر میکروارگانیسم‌ها شده، نهایتاً پس از اتمام آن، پروپیلن گلیکول باقی‌مانده در محیط با کمک تعداد بیشتری از سلول‌ها مورد تجزیه قرار می‌گیرد. به همین دلیل درصد تجزیه‌ی

زیستی پروپیلن گلیکول در محیط با کمک اوره به عنوان منبع نیتروژن در مقایسه با کاربرد سایر منابع نیتروژن افزایش می‌یابد. از سوی دیگر برخی از محققین نیز در مطالعات خود برای یافتن منبع مناسب نیتروژن موفق به تشخیص منابعی همچون NH_4Cl و یا $NaNO_3$ به عنوان منبع مناسب نیتروژن شدند (۱۸). تفاوت در منبع بهینه‌ی نیتروژن می‌تواند به مشخصات شیمیایی محل جداسازی میکروارگانیسم‌ها و یا منابع نیتروژنی که قبلاً در دسترس میکروارگانیسم‌ها بوده است مربوط باشد.

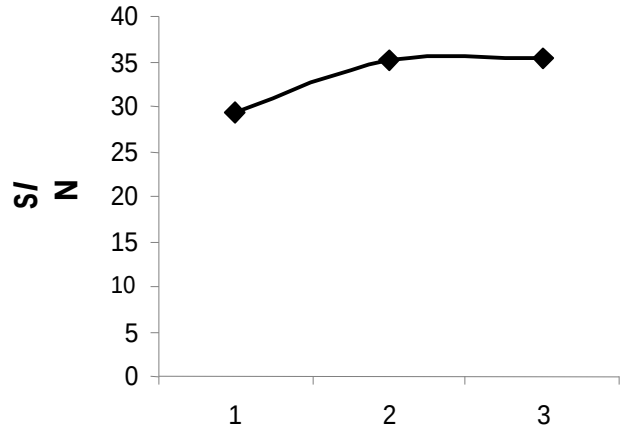
تأثیر COD ورودی (تأثیر غلظت منبع کربن): در این مطالعه از سه غلظت COD ناشی از پروپیلن گلیکول برابر با ۴۰۰، ۹۰۰ و ۱۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر برای یافتن بهترین COD ورودی به راکتور استفاده شد. همان‌طور که در نمودار ۱-پ مشاهده می‌گردد، با افزایش میزان COD ورودی به راکتور، نسبت S/N که شاخصی از پاسخ سیستم به تغییرات غلظت COD است، افزایش می‌یابد، به‌طوری که در COD برابر با ۱۳۰۰ بیشترین میزان پاسخ مشاهده شده است.



نمودار ۱-پ: تاثیر COD ورودی (غلظت منبع کربن) به راکتور بر درصد حذف پروپیلن گلیکول
سطوح غلظت‌های ورودی (میلی‌گرم در لیتر): ۱: ۴۰۰ ۲: ۹۰۰ ۳: ۱۳۰۰

طبق تحلیل‌های صورت‌گرفته این میزان به عنوان مقدار بهینه گزارش می‌گردد. با افزایش میزان پروپیلن گلیکول (منبع کربن و ماده‌ی محدود کننده) در محیط، میکروارگانیسم‌ها به دلیل افزایش موادغذایی در دسترس، مدت زمان بیشتری در محدوده‌ی رشد لگاریتمی قرار خواهند داشت و در نتیجه، غلظت توده‌ی میکروبی می‌تواند به شدت افزایش یابد که این امر به نوبه‌ی خود منجر به تجزیه‌ی بیشتر پروپیلن گلیکول می‌گردد. البته افزایش بیش از حد این ترکیب نیز می‌تواند منجر به ایجاد سمیت شده و نهایتاً منجر به کاهش رشد میکروارگانیسم‌ها گردد، که در این مطالعه با توجه به رشد مناسب میکروارگانیسم‌ها غلظت پروپیلن گلیکول در تمامی سطوح کمتر از حد سمیت آن می‌باشد.

تأثیر شوری فاضلاب ورودی به راکتور: در نمودار ۱-ت تاثیر شوری فاضلاب بر درصد حذف COD نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد شوری از ۴ درصد به ۶ درصد میزان حذف COD افزایش می‌یابد.



نمودار ۱ -ت: تاثیر شوری فاضلاب بر درصد حذف پروپیلن گلیکول
سطوح درصد شوری: ۴٫۱٪ ۶٫۲٪ ۸٫۳٪

ورود و خروج بخشی از ترکیبات مورد نیاز سلول (مانند یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم) توسط پدیده‌ی انتشار در غشاء سلولی صورت می‌پذیرد. بخشی از ترکیبات فوق برای رشد سلول‌ها بسیار ضروری می‌باشد. بنابراین افزایش و یا کاهش غلظت این یون‌ها در آب می‌تواند به نوبه خود منجر به تغییر میزان هدایت الکتریکی آب (تغییر شوری) گردد، که این امر نیز تأثیر مستقیمی بر روی توانایی جذب این ترکیبات توسط سلول دارد. از سوی دیگر افزایش بیش از حد شوری می‌تواند منجر به خروج آب از غشاء سلولی به سبب پدیده‌ی اسمز گردیده، رشد سلول را مختل سازد. معمولاً پساب صنایع نفت و گاز، صنایع شیمیایی و صنایع تولید ضدیخ با غلظت‌های بالای پروپیلن گلیکول، دارای شوری بالایی نیز می‌باشند (۱۹). بنابراین میکروارگانیسم‌های به کار گرفته شده در تصفیه‌ی این گونه فاضلاب‌ها بایستی برای تحمل شوری بالا مورد بررسی قرارگیرند. شوری بالا منجر به افزایش فشار اسمزی گردیده، در ورود و خروج برخی از مواد از سلول تداخل ایجاد می‌نماید. از آنجایی که تفاوت محسوسی در کارائی میکروارگانیسم‌ها در شوری ۶ و ۸ درصد مشاهده نمی‌شود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که میکروارگانیسم‌های به کار رفته در این مطالعه قادر به ادامه‌ی فعالیت در فاضلاب‌هایی با شوری بالاتر نیز می‌باشند. جدول ۳ تحلیل واریانس (ANOVA) نتایج را نشان می‌دهد.

جدول ۳: تحلیل واریانس نتایج (ANOVA)

متغیر	درجه‌ی آزادی	واریانس	درصد تأثیر هر عامل
PH	۲	۵۱/۱۷۶	۲۵/۷۴۶
نوع منبع نیتروژن	۲	۸۱/۴۹۶	۴۱
غلظت COD ورودی	۲	۳۲/۰۸۵	۱۶/۱۴۲
درصد شوری	۲	۳۴/۰۱	۱۷/۱۱
کل	-	-	۱۰۰

از آنجا که هر چهار عامل در این تحقیق، سه سطحی در نظر گرفته شده‌اند، میزان درجه‌ی آزادی برای مقایسه‌ی مقادیر پاسخ در سه سطح از هر عامل برابر با ۲ می‌باشد. در بین پارامترهای آماری مختلف در این جدول، ستون آخر در سمت راست که معرف درصد تأثیر هر عامل بر پاسخ می‌باشد،

مفهوم ملموس‌تری دارد. این پارامتر از روی سایر پارامترهای آماری در این جدول محاسبه شده است (۱۶و۱۱).

بحث

درصد تاثیر عوامل مختلف بر تجزیه‌ی بیولوژیکی پروپیلن گلیکول در محدوده‌ی سطوح در نظر گرفته شده نشان می‌دهد که همه عوامل کم و بیش دارای اهمیت نسبی برای تأثیر بر پاسخ می‌باشند. همان‌طور که مشخص است مؤثرترین عوامل، به ترتیب نوع منبع نیتروژن، pH، درصد شوری فاضلاب ورودی، و در نهایت غلظت COD ورودی به آن می‌باشد. آگنزیسکا و همکاران بنابر یک مطالعه‌ی انجام شده بر روی تجزیه‌ی زیستی پروپیلن گلیکول اظهار کردند که آثار سمیتی این ترکیب بر روی میکروارگانیزم‌ها از غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و بیشتر آغاز می‌شود (۲۰).

لی و همکارانش در مطالعات خود موفق به یافتن چند میکروارگانیسم نفت خوار شدند که توانایی زیستن در شوری حداکثر ۶ درصد را داشتند. میکروارگانیسم‌های یافت شده توسط لی در مقایسه با میکروارگانیسم‌های مورد استفاده در این مطالعه، توان تحمل شوری کمتری را دارا بودند (۱۹).

با توجه به نمودارهای تأثیر عوامل و نتایج جدول ANOVA می‌توان شرایط بهینه‌ی نسبی برای رسیدن به حداکثر رشد میکروارگانیسم‌ها و در نتیجه، بیشترین درصد حذف پروپیلن گلیکول را نسبت به دو سطح دیگر هر عامل بدست آورد. جدول ۴ شرایط بهینه‌ی نسبی تعیین شده در روش تاگوچی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تمام عوامل بایستی در بالاترین سطح خود قرار گیرند تا بهترین پاسخ بدست آید. به بیان دیگر شرایط بهینه‌ی عوامل در محدوده‌ی سطوح انتخاب شده، عبارت‌از pH برابر با ۸، منبع نیتروژن اوره، میزان COD ورودی برابر با ۱۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، و در نهایت شوری ۸ درصد بود. در این جدول همچنین میزان سهم مقدار بهینه‌ی، هر یک از عوامل در بهبود پاسخ تبدیل یافته (S/N) در ستون آخر نشان داده شده است. در صورت اعمال شرایط بهینه، مقدار پاسخ تبدیل یافته، بیش از ۱۲/۷ واحد نسبت به مقدار متوسط پاسخ‌های فعلی (حدود ۳۳) بهبود خواهد یافت و در نتیجه، پاسخی معادل با ۴۶/۰۶ را بدست خواهد داد.

جدول ۴: شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر رشد میکروارگانیسم‌ها

عامل	بهترین سطح	میزان سهم در بهبود پاسخ (S/N)
pH	۸	۳۰/۰۴۴
منبع نیتروژن	$CO(NH_3)_2$	۴/۳۴۲
COD ورودی (میلی‌گرم در لیتر)	۱۳۰۰	۳/۴۱۱
درصد شوری	٪۸	۱/۹۶۵
سهم کل عوامل در بهبود پاسخ		۱۲/۷۶۲
متوسط پاسخ‌های فعلی در آزمایش‌های انجام شده		۳۳/۲۹۸
پاسخ پیش‌بینی شده در شرایط بهینه (S/N)		۴۶/۰۶۰

با مقایسه‌ی این پاسخ پیش‌بینی شده با مقادیر پاسخ‌های بدست آمده در ستون آخر جدول ۲، می‌توان به بهبود پاسخ تحت شرایط بهینه پی‌برد. رضائی و بادکوبی در تحقیقی که بر روی تأثیر مواد هوموسی بر رشد باکتری‌ها در فرآیند اصلاح زیستی هیدروکربن‌های چند حلقه‌ای آروماتیک انجام دادند، با استفاده از روش تاگوچی توانستند شرایط بهینه را با معیارهای آماری تعیین نمایند (۲۱). همچنین راج و کوئن باکمک روش تاگوچی شرایط بهینه‌ی فرآیند UV/H_2O_2 را در فرآیند اکسیداسیون پیشرفته‌ی تصفیه فاضلاب تعیین نمودند (۲۲).

نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده در این مطالعه، می‌توان نتیجه‌گرفت که میکروارگانیسم‌هایی که در مدت ۱۶۳ روز راهبری سیستم در پنج غلظت مختلف ورودی به راکتور لجن

فعال اختلاط کامل، به تدریج با مصرف پروپیلن گلیکول در غلظت‌های بالا سازگار شده، قادر به حذف ۸۵ درصد COD ناشی از این ترکیب در بالاترین غلظت ورودی بودند. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان اظهار کرد که با کمک روش تحلیل آزمایشات می‌توان شرایط بهینه را تعیین نمود و کارائی سیستم‌های تصفیه‌ی بیولوژیکی را ارتقا داد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های مالی و معنوی دانشگاه علوم پزشکی ایران سپاس‌گزاری می‌نمایند.

منابع

1- Mittal L, Kurup V, Gupta P. Use of waste materials bottom ash de-oiled soya, as potential adsorbents for the removal of Amaranth from aqueous solution. *J Hazard Mater*. 2005; 117: 171-8.

2- Grzeskowiak A, Grzeskowiak T, Zembrzuska J, Lukaszewski Z. Comparison of biodegradation of polyethyleneglycols and polypropyleneglycols. *Chemospher* . 2006; 64: 803-9.

3- Grzeskowiak A, Grzeskowiak T, Zembrzuska J, et al. Biodegradation of polypropyleneglycols under the conditions of the OECD screening test. *ChemospHere*. 2007; 67: 928-33.

4- Cornell J. The environmental chemistry of ADF component chemicals [dissertation]. USA: University of Colorado; 2001.

5- Pillard DA. Comparative toxicity of formulated glycol deicers and pure ethylene and propylene glycol to Ceriodaphnia Dubia and pimephales promelas. *Environ Toxicol Chem*. 1995; 14: 311-5.

6- Bielefeldt A, Illangasekare T, Uttecht M, LaPlante R. Biodegradation of propylene glycol and associated hydrodynamic effects in sand. *Water Res*. 2002; 36: 1707-14.

7- Yau Y, Chao C, Hwang S. Optimization of Chinese interface design in motion environments. *Displays*. 2008; 29: 308-15.

8- Lim JM, Kim KS, Yum BJ, et al. Determination of an optimal configuration of operating policies for direct-input-output manufacturing systems using the Taguchi method. *Computers and Industrial Engineering*. 1996; 31: 555-60.

9- Aizenchtadt E, Ingman D, Friedler D. Quality control of wastewater treatment: A new approach. *Eur J Oper Res*. 2008; 189: 445-58.

10- Huang C, Hsu T, Liu C. The Mahalanobis-Taguchi system-Neural network algorithm for data-mining in dynamic environments, *Expert Systems with Applications*. 2008; 36: 5475-80.

11- Daneshvar N, Khataee AR, Rasoulifard M, Pourhassan M. Biodegradation of dye solution containing Malachite Green: Optimization of effective parameters using Taguchi method. *J Hazard Mater*. 2007; 143: 214-9.

12- Shupack DP, Anderson TA. Mineralization of

propylene glycol in root zone soil. *Water Air Soil Pollut*. 2000; 118: 53-64.

13- Grzeskowiak A, Grzeskowiak T, Zembrzuska T, Fran´ska M, Franski R, Lukaszewski Z. Bio-oxidation of tripropylene glycol under aerobic Conditions. *Biodegradation*. 2008; 19: 365-73.

14- Tellez, Gilbert T, Nirmalakhandan, Jorge L. performance evaluation of an active sludge system for removing petroleum hydrocarbons from oilfield produced water. *Adv Environ Res*. 2002; 6: 455-470.

15- Shojalssadati S, Asadallahi M. Industrial Biotechnology. Iran: Tarbiat Modares University Publication; 2002.

16- APHA, AWWA, WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. USA: Washington DC; 2005.

17- Metcalf E. Waste water engineering treatment and reuse. USA: Mc Graw Hill; 2003.

18- Li Q, Congbao K, changkai Z. Waste water Produced from an oilfield and continuous treatment with and oil-degrading bacterium. *Process Biochem*. 2005; 40: 873-7.

19- Agnieszka Z, Tomasz G, Joanna Z, Magdalena F, Rafal F, Zenon L. Bio-oxidation of tripropylene glycol under aerobic conditions. *Biodegradation*. 2008; 19: 365-73.

20- Rezaei Kalantary R, Badkoubi A. Effect of humic compounds on bacterial growth in bioremediation of PAHs. *Iranian J Environ Health Sci*. 2006; 3: 31-8.

21- Raj C, Quen H. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: Optimization of UV/H_2O_2 process through a statistical technique. *Chem Eng Sci*. 2005; 60: 5305-11.

Optimization of Propylene Removal in a Complete Mixed Activated Sludge Bioreactor by Taguchi Method

Jorfi S[1], Rezaei Kalantary R[2], Talaie AR[3], Mehrabani MM[4], Farzadkia M[2]

[1]Dept. of Environment and Occupational Health, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

[2]Dept. of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

[3]Dept. of Civil Engineering and Environment, Jami Institute of Technology, Tehran, Iran.

[4]Fars Province Industerial Complex, Shiraz, Iran.

***Corresponding Author*:** Jorfi S, Dept. of Environment and Occupational Health, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

***E-mail*:** Sahand359@yahoo.com

Received: 23 Dec 2008 **Accepted:** 3 May 2009

Background and Objective: Exposure to propylene glycol can lead to many health risks on blood, skin and kidney. Biodegradation of synthetic wastewater containing propylene glycol was studied in a continuous conventional activated sludge bench scale reactor. Optimum conditions of microorganisms' growth for biodegradation of propylene glycol were determined by Taguchi method.

Materials and Methods: Primary microorganisms for start up of the bioreactor were obtained from sludge return line of a municipal wastewater treatment plant and adapted to different concentrations of propylene glycol in a conventional activated sludge reactor. Optimum growth conditions of microorganisms and also operational conditions of the system including pH, influent COD, source of nitrogen and salinity were determined in three levels by Taguchi method.

Results: COD removal efficiency in conventional activated sludge reactor for influent concentrations of 400, 700, 900, 1100 and 1300 mg/L were 98%, 95%, 95%, 90% and 85% respectively. Optimization of the process by Taguchi method showed that source of nitrogen urea, pH = 8, salinity of 8% and influent COD of 1300 mg/L with importance priority of 41%, 25%, 17.11% and 16.142% were as optimum growth conditions of microorganisms and also operational conditions of the system for propylene glycol biodegradation respectively.

Conclusion: According to the results obtained from this work, it can be concluded that optimum conditions of biological processes and improvement the efficiency of bioreactors can simply be done by the use of such experimental designs.

Key words: Propylene glycol, Conventional activated sludge, Wastewater treatment, Taguchi method