بهینه‌سازی فرآیند کلرزنی در گندزدایی شیرابه زباله کهنه با استفاده از روش سطح پاسخ

حمزه علی جمالی[1]، کاووس دیندارلو[2]، مهرداد فرخی[3*]

۱. گروه بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

۲. گروه بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان، بندر عباس، ایران

۳. گروه بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی البرز، کرج، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۹/۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱/۲۳

چکیده

زمینه و هدف: شیرابه زباله شهری بدلیل بار آلودگی بالای میکروبی، یکی از تهدیدات بزرگ زیست محیطی مکان‌های دفن پسماند محسوب می‌گردد. کلر زنی یکی از روش‌های ساده گندزدایی آب و فاضلاب محسوب می‌گردد اما برای گندزدایی شیرابه مورد توجه قرار نگرفته است. هدف از این تحقیق بررسی کارآیی کلر در گندزدایی شیرابه و بهینه سازی اثر متغیرهای غلظت و زمان تماس درحذف کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی به عنوان شاخص آلودگی میکربی بود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه توصیفی- تحلیلی، پایش شاخص‌های باکتریایی در شیرابه مکان دفن پسماندهای شهر قزوین طی یک سال انجام شد. سپس با انجام آزمایشات مقدماتی، دامنه غلظت کلر و زمان تماس در غیر فعال سازی شاخص‌های میکروبی شیرابه مورد بررسی قرار گرفت. جهت بهینه سازی اثر متغیرهای موثر شامل غلظت کلر و زمان تماس درغیر فعال سازی این شاخص ها، روش پاسخ سطح بر اساس طرح مرکب مرکزی بکار گرفته شد. بر این اساس تعداد۱۳ آزمایش روی نمونه‌ها انجام شد. آزمایشات شامل BOD، COD، کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی بود. تمامی آزمایشات بر اساس دستورالعمل ارائه شده در کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایشات آب و فاضلاب بود.

یافته ها: نتیجه این مطالعه نشان داد که شاخص‌های آلودگی میکروبی دارای حساسیت نسبتاً بالایی نسبت به غیر فعال سازی با کلر دارند، بطوریکه در غلظت کلر ۲ mg/L و زمان ماند ۹ دقیقه ۱۰۰٪ کل کلی فرم‌ها و در غلظت کلر mg/L ۰/۵و زمان ماند ۱۲ دقیقه ۱۰۰٪ کلی فرم‌های مدفوعی از بین رفتند. با استفاده از روش سطح پاسخ شرایط بهینه غیر فعال سازی این باکتری‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج تحلیل نشان داد که در زمان تماس و غلظت کلر بترتیب برابر با ۹/٤min و ۲/۹۹mg/L ، راندمان غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی بترتیب به ۸۹/۱٦٪ و ۱۰۰٪ می‌رسد.

نتیجه گیری: جهت گندزدایی شیرابه می‌توان از کلر استفاده نمود. با اینحال در صورت وجود بارآلی بالا در شیرابه، با توجه به پتانسیل ایجاد محصولات جانبی ناشی از کلر زنی، در انتخاب کلر به عنوان گندزدا، بایستی ملاحظات بهداشتی و زیست محیطی مد نظر قرار گیرد.

کلمات کلیدی: شیرابه، گندزدایی، کلرزنی، روش سطح-پاسخ، مدل سازی

* گروه بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی البرز، کرج، ایران

ایمیل: mfarokhikhb@yahoo.com - شماره تماس: ۰۲٦-۳٤٦٤۳۲۵۵

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]

مقدمه

دفن بهداشتی بطور گسترده ای برای دفع پسماندهای شهری بکار می‌رود[1,2]. در یک جایگاه دفن، آب ناشی از بارش‌های آسمانی، نشت آب‌های سطحی و زیر زمینی و رطوبت موجود در پسماند باعث انحلال مواد قابل حل در مایع شده و در نهایت مایع سیاه رنگی بنام شیرابه از توده پسماند دفن به بیرون نشت می‌کند[3,4]. اگر طبق اصول مهندسی یک جایگاه دفن طراحی و بطور اصولی مورد بهره برداری قرار گیرد، اثرات زیست محیطی آن کاهش می‌یابد، اما باز هم شیرابه تولیدی یکی از خطرات بزرگ زیست محیطی محسوب می‌گردد[5]. خصوصیات کیفی شیرابه با توجه به ترکیبات پسماند، میزان بارش، هیدرولوژی مکان دفن، پوشش سطح مکان دفن، روش طراحی و نحوه بهره برداری متغیر است. روش‌های تصفیه فیزیکی، شیمیایی و زیستی گوناگونی برای زدایش آلاینده‌های آلی قابل تجزیه و غیر قابل تجزیه زیستی، اسیدهای هیومیک و فولویک و مواد معدنی از قبیل فلزات سنگین، سدیم، کلسیم، سولفات، آمونیاک و سموم با غلظت بالا بکار می‌رود[6]. در پسماندهای شهری جوامع در حال توسعه، دامنه وسیعی از عوامل بیماری زای روده ای شامل عوامل انگلی و بیماری زا که در دستگاه گوارش انسانی وجود دارد، یافت می‌شود[7]. عموماً، بدلیل شرایط سخت محیط برای عوامل بیماری زا، تمامی آنها غیر فعال شده و یا در طی تجربه مواد آلی از بین می‌روند[8]. با اینحال احتمال حضور باکتری‌های بیماری زا در شیرابه وجود دارد. در مقایسه با اطلاعات موجود درباره خصوصیات فیزیکی و شیمیایی شیرابه، اطلاعات درباره تنوع باکتری‌های بیماری زای موجود در این نوع فاضلاب محدود است[9,10]. حضور عوامل بیماری زای باکتریایی در شیرابه توسط محققین گزارش شده است[11,12]. حضور شاخص‌هایی مثل کلی فرم‌های مدفوعی و استرپتوکوک‌ها در شیرابه، یک نگرانی جدی ناشی از شیرابه در دراز مدت است[13].جمعیت باکتریایی و بخصوص تعداد کل کلی فرم ها، کلی فرم‌های مدفوعی، استرپتوکوک‌های مدفوعی با توجه به خصوصیات شیرابه و سن مکان دفن متغیر است[14]. باکتری‌های بیماری زا می‌توانند آب را آلوده نمایند، بنابراین بایستی برای جلوگیری از خطرات ناشی از حضور آنها، منابع آب کنترل گردند[9]. در اغلب موارد از خانواده گروه کلی فرم به عنوان شاخص آلودگی میکروبی آب استفاده می‌کنند. گروه کلی فرم‌های کل شامل ۸۰ گونه مختلف با خصوصیات مشترک برای رشد در محیط کشت انتخابی هستند. هرچند کلی فرم‌های کل به تعداد زیاد در مدفوع حیوانات خونگرم وجود دارند، آنها دارای منشاء غیر مدفوعی نیز می‌باشند. حضور آنها در محیط‌های غیر مدفوعی، از اعتبار آنها به عنوان یک شاخص میکروبی مدفوعی می‌کاهد. اشریشیاکلی اختصاصی ترین شاخص میکروبی آلودگی، در مدفوع حیوانات خونگرم و پرندگان یافت می‌شود[15]. حضور شاخص‌های میکروبی الزاماً به معنی آلودگی آب نیست، اما از آن می‌توان به عنوان شاخص آلودگی احتمالی آب به باکتری‌های بیماری زا استفاده کرد[16]. کلر و ترکیبات آن هنوز به عنوان پرکاربردترین ترکیب گندزدا است، زیرا این ترکیب ضمن اینکه دارای پتانسیل اکسیداسیون بالایی است، بدلیل دارا بودن باقیمانده در آب باعث حفاظت از آب از آلودگی‌های ثانویه می‌شود[17]. همچنین این اکسیدان بر روی طیف وسیعی از عوامل میکروبی موثر بوده و هزینه تامین آن پایین است[18]. از کلر بطور گسترده‌ای در تصفیه آب و فاضلاب استفاده می‌گردد و تحقیقات زیادی در مورد خواص ضد میکروبی آن انجام شده است. اما در مورد استفاده از آن در تصفیه شیرابه تحقیقات زیادی انجام نشده است. این تحقیق

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]

روی تعیین تعداد شاخص عوامل بیماریزای باکتریایی در شیرابه مکان دفن و غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها و اشریشیاکلی توسط کلر است. روش سطح پاسخ که شامل یک سری از مدل‌های ریاضی و آماری است، برای طراحی آزمایشات، ساخت مدل‌ها و ارزیابی اثرات متغیرها و بررسی شرایط بهینه متغیرها برای پیش بینی پاسخ‌های آنها است[19]، برای تعیین شرایط بهینه غیر فعال سازی شاخص‌های باکتریایی توسط متغیرهای زمان تماس و غلظت کلر به کار رفت.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری نمونه شیرابه و حفاظت نمونه‌ها

استفاده از مکان دفن زباله شهر قزوین از ۳۲ سال پیش شروع شده و هنوز نیز قسمتی از پسماندهای شهری و صنعتی در این مکان دفن می‌گردد. نمونه برداری از شیرابه خروجی از حوضچه انباشت شیرابه صورت گرفت. دوره نمونه برداری در سال های ۱۳۹۱-۱۳۹۰ بود. نمونه‌های شیرابه به مدت یک سال و هر ماه یکبار از محل دفن زباله های شهری که شرایط نسبتاً هوازی غالب بود، جمع آوری گردید. پس از نمونه برداری نمونه‌ها در مجاورت یخ به آزمایشگاه منتقل و در یخچال (دمای ٤°C) نگهداری گردید. آزمایشات شامل BOD، COD، کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی بود. تمامی آزمایشات براساس دستورالعمل ارائه شده در کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایشات آب و فاضلاب انجام شد[20]. درجه حرارت و pH در محل آزمایش و با استفاده از وسایل سنجش قابل حمل انجام شد.

مراحل انجام آزمایشات میکروبی شامل دو مرحله، آزمایش احتمالی و آزمایش تاییدی بود. دوره انکوباسیون برای هر آزمایش ٤٨-٢٤ ساعت بود. که در مرحله احتمالی، محتمل ترین تعداد کلی فرم در ۱۰۰ml نمونه تعیین شده و در مرحله تاییدی کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی تعیین گردید. جهت انجام آزمایشات میکروبی از سه محیط کشت لاکتوز براث، بریلیانت گرین بیل براث و EC براث استفاده شد.

کلر زنی شیرابه

در این مطالعه، از محلول هیپوکلریت سدیم با میزان کلر در دسترس ٤٪ به عنوان گندزدا استفاده شد. برای تهیه محلول‌های کلر مادر مورد نیاز، حجم مشخصی از آن با آب خالص مخلوط گردید. تمامی ظروف شیشه ای مورد استفاده ابتدا اسید شویی شده و سپس سه بار با آب مقطر آبکشی و خشک شد. آزمایشات مقدماتی برای غیرفعال‌سازی شاخص‌های باکتریایی در یک ظرف شیشه ای تیره رنگ، به حجم ۳ لیتر و در غلظت‌های کلر ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ mg/L با زمان‌های تماس ۰-۱۵min انجام شد. تمامی آزمایشات در درجه حرارت محیط آزمایشگاه (۲۵±۲ °C) انجام شد. بدلیل عدم وجود تحقیقات قبلی در مورد حدود میزان مصرف کلر و زمان تماس مورد نیاز، یک سری آزمایشات اولیه انجام شد. بر پایه نتایج حاصل از این آزمایشات مقدماتی و جهت اجتناب از مصرف بیش از مقدار مورد نیاز ماده گندزدا و جلوگیری از پیش بینی زمان تماس اضافی، غلظت کلر در دامنه ۱-۳ mg/L و زمان تماس ۵-۱۰min برای طراحی تحقیق جهت بدست آوردن شرایط بهینه برای غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی بکار رفت .در طی انجام آزمایشات و پس از هر آزمایش، دما وpH نمونه‌ها کنترل و بترتیب در حدود ۲۵°C و ۷ نگهداری می‌شد.

طراحی تحقیق

با توجه به نتایج مطالعات مقدماتی انجام شده، کلر در سه سطح غلظتی ۱، ۲ و ۳ mg/L و زمان تماس ۵، ۷/۵ و ۱۰ min انتخاب شد. این سه سطح متغیرهای مستقل به صورت کدهای ۱+ (بالا)، ۰(مرکزی) و ۱- (پایین) در نظر گرفته شد. روش سطح پاسخ برای مدل سازی و تحلیل ممشکلات مرتبط با یک پاسخ، که تحت تاثیر چندین متغیر است، با هدف بهینه سازی پاسخ مطلوب است[21]. در این مطالعه، طراحی آزمایشات و

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]

تحلیل داده‌ها بر اساس طرح مرکب مرکزی و با استفاده از نرم افزار Design Expert7 انجام شد. معمولاً مدل‌های رتبه دوم برای برآورد شرایط بهینه بکار می‌روند. بنابراین در این مطالعه، برای ارزیابی داده‌های آزمایش، مدل مرتبه دوم (Full quadratic model) مورد استفاده قرار گرفت (رابطه ۱). جهت جلوگیری از خطای سیستمیک (Systematic bias) آزمایشات بصورت تصادفی انجام شد[۲۲و۲۳]. ضرایب مدل مرتبه دوم، تفسیر کننده میزان غیر فعال سازی شاخص‌های آلودگی باکتریایی(پاسخ) به عنوان عملکرد متغیرهای مستقل(فاکتورها) می‌باشند. داده‌های تحقیق به وسیله رگرسیون چند گانه (Multiple regression) آنالیز گردید. ضرایب با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) تحلیل گردید و مقدار ($p\leq ۰/۰۵$) به عنوان سطح معنی داری تعیین شد.

$$Y=\beta_0+\sum_{i=1}^{k}\beta i.xi+\sum_{i=1}^{k}\beta ii.xi^2+\sum_{ii\leq j}^{k}\sum_{j}^{k}\beta ij.xi.xj+\cdots+e \quad (۱)$$

که Y متغیر پاسخ، i ثابت خطی، j ثابت درجه دوم، β ثابت رگرسیون، k تعداد فاکتورهای مورد مطالعه و بهینه شده در آزمایشات و e خطای تصادفی هستند.

یافته ها

برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی شیرابه مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: خصوصیات کیفی شیرابه مکان دفن زباله‌های شهری

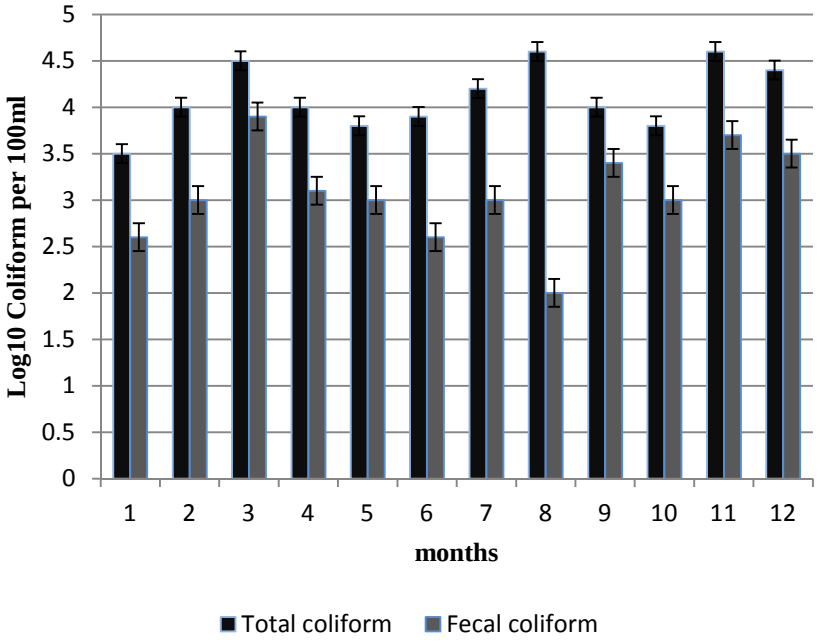
ردیف	پارامتر	مقدار متوسط
۱	درجه حرارت (°C)	۲۵
۲	pH	۷/۵
۳	COD (mg/L)	۷۵۵۰
٤	BOD_5 (mg/L)	۸۷۰
٥	TSS (mg/L)	۲۱۰۰
٦	قلیائیت (mg/L as $CaCO_3$)	٦۱۰۰
۷	BOD_5/COD	۰/۱۱۵

همچنین نتایج آنالیز حاصل از پایش شاخص‌های آلودگی باکتریایی شیرابه مورد مطالعه در نمودار (۱) ارائه شده است.

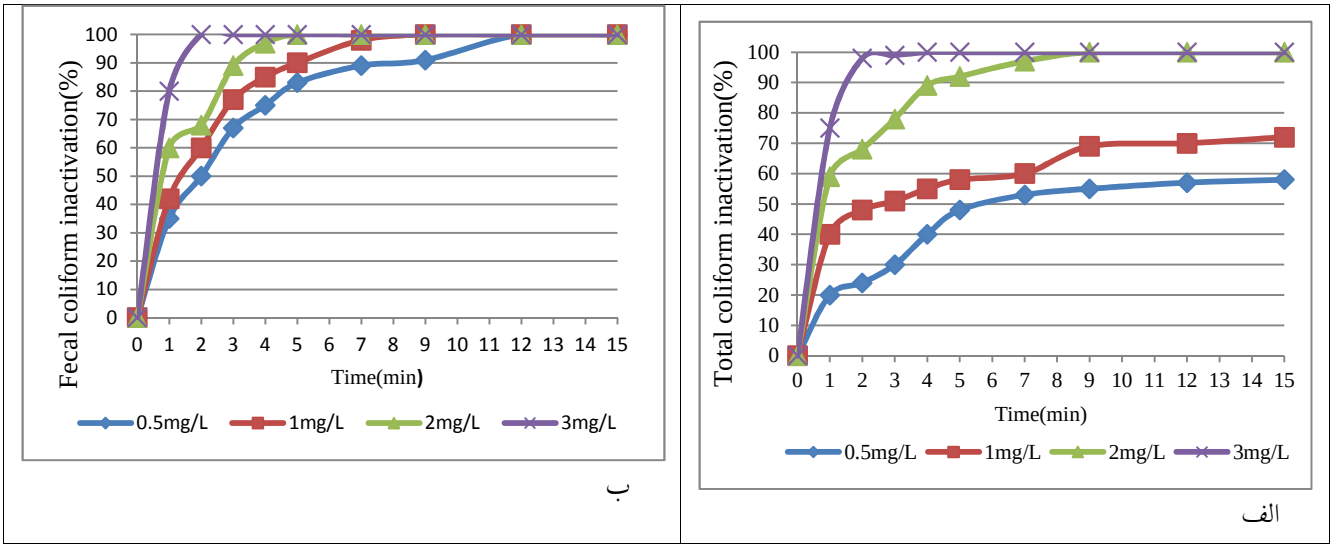
نتایج آزمایشات مقدماتی غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی در زمان‌های تماس و غلظت‌های مختلف کلر در نمودار(۲) ارائه شده است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]



نمودار ۱: نتایج سنجش شاخص‌های آلودگی باکتریایی شیرابه در یک دوره زمانی یک ساله



نمودار۲: نتایج غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها (الف) و کلی فرم‌های مدفوعی(ب) در غلظت‌ها و زمان تماس‌های مختلف

نتایج حاصل از آزمایشات طراحی شده بر اساس روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی برای غیر فعال سازی شاخص‌های باکتریایی، در جدول (۲) ارائه شده است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]

جدول ۲: راندمان غیر فعال سازی شاخص‌های باکتریایی در شرایط مختلف آزمایشی

شماره آزمایش	شماره تصادفی	زمان تماس(min)	غلظت کلر(mg/L)	راندمان حذف کل کلی فرم ها(٪)	راندمان حذف کلی فرم مدفوعی(٪)
۱	۹	۷/۵	۲	۷۹	۹۲
۲	۲	۱۰	۱	۲۰	۵۰
۳	۱	۵	۱	۲۸	۳۱
٤	۱۳	۷/۵	۲	۵۳	۸۲
۵	۳	۵	۳	۳۵	٤۵
٦	٤	۱۰	۳	۸۲	۹۵
۷	٦	۱۰	۲	۷۹	۹۰
۸	۱۲	۷/۵	۲	۷۹	۹۰
۹	۵	۵	۲	۳٤	٤۲
۱۰	۸	۷/۵	۳	۸۳	۹۱
۱۱	۱۰	۷/۵	۲	۷۳	۸۹
۱۲	۱۱	۷/۵	۲	۸۰	۹۱
۱۳	۷	۷/۵	۱	۳۰	٦۹

جدول ۳: نتایج تحلیل واریانس عوامل مدل مرتبه دوم پاسخ سطح در غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها در شیرابه

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-Value	p-value Prob>F	نتیجه
مدل	٦٦۳۸/۵۳	۵	۱۳۲۷/۷۱	۱۰/۹۰	۰/۰۰۳٤	معنی دار
زمان تماس(A)	۱۱۷٦	۱	۱۱۷٦	۹/٦٦	۰/۰۰۲۸	معنی دار
غلظت کلر(B)	۲٤۸۰/٦۷	۱	۲٤۸۰/٦۷	۲۰/۳۷	۰/۰۰۱۳	معنی دار
A * B	۷۵٦/۲۵	۱	۷۵٦/۲۵	٦/۲۱	۰/۰٤۱۵	معنی دار
A^2	٦۸۸/۸۸	۱	٦۸۸/۸۸	۵/٦٦	۰/۰٤۹۰	معنی دار
B^2	٦۸۸/۸۸	۱	٦۸۸/۸۸	۵/٦٦	۰/۰٤۹۰	معنی دار
باقیمانده	۸۵۲/۳۹	۷	۱۲۱/۷۷			
نقص برازش	۳۳۱/۵۹	۳	۱۱۰/۵۳	۰/۸۵	۰/۵۳۵۰	معنی دار نیست
خطای خالص	۵۲۰/۸	٤	۱۳۰/۲			
کل	۷٤۹۰/۹۲	۱۲				

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]

جدول ٤: نتایج آنالیز واریانس عوامل مدل مرتبه دوم پاسخ سطح در غیر فعال سازی کلی فرم‌های مدفوعی در شیرابه

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-Value	p-value Prob>F	نتیجه
مدل	٦٣٢١/٥٣	٥	١٢٦٤/٣١	٦٠/٥٧	<٠/٠٠٠١	معنی دار
زمان تماس(A)	٢٢٧٧/٦٠	١	٢٢٧٧/٦٠	١١٠/٢٠	<٠/٠٠٠١	معنی دار
غلظت کلر(B)	١١٠١/٦١	١	١١٠١/٦١	٥٢/٨٢	٠/٠٠٠٢	معنی دار
A * B	٢٤١/٨	١	٢٤١/٨	١١/٦٠	٠/٠١١٣	معنی دار
A^2	١٥٥٨/٣٤	١	١٥٥٨/٣٤	٧٥/١٩	<٠/٠٠٠١	معنی دار
B^2	٢٦٢/٧٤	١	٢٦٢/٧٤	١٢/٦٦	٠/٠٠٩٢	معنی دار
باقیمانده	١٤٦/١٢	٧	٢٠/٨٧			
نقص برازش	٨١/٩٠	٣	٢٧/٣	١/٧	٠/٣٠٣٧	معنی دار نیست
خطای خالص	٦٤/٢٢	٤	١٦/٠٥			
کل	٦٤٦٧/٦٥	١٢				

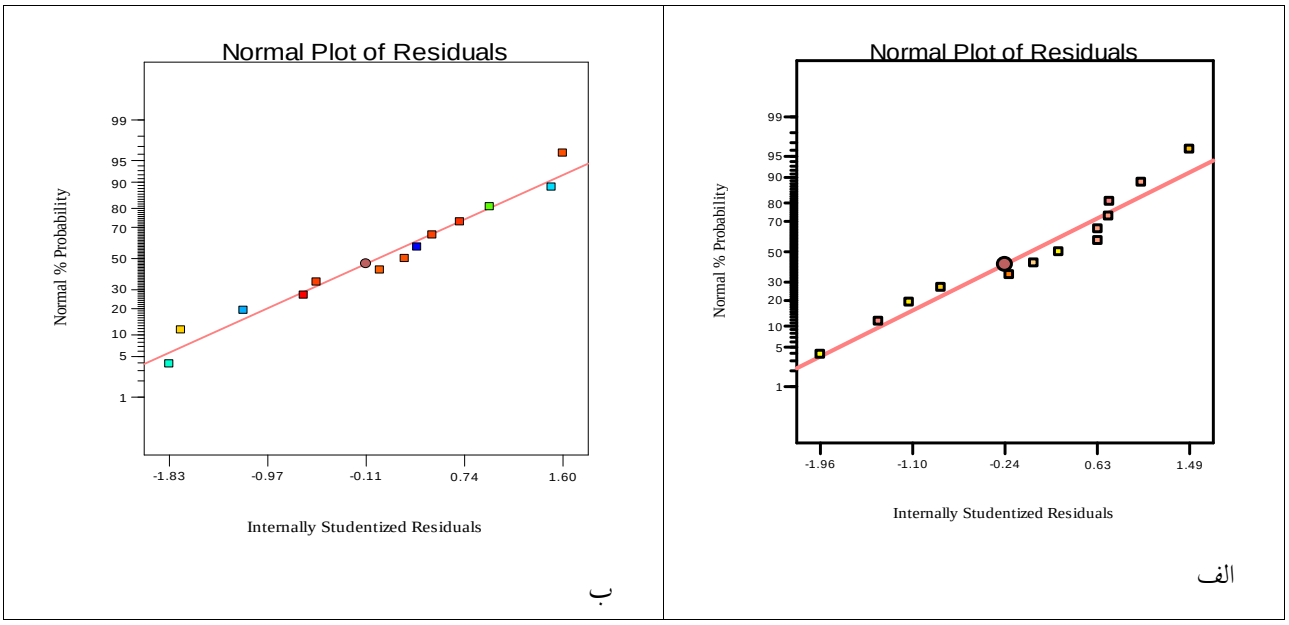
نتایج آنالیز واریانس عوامل مدل مرتبه دوم پاسخ سطح در غیر فعال سازی شاخص‌های میکروبی موجود در شیرابه در جداول ٣ و ٤ ارائه شده اند.

بحث

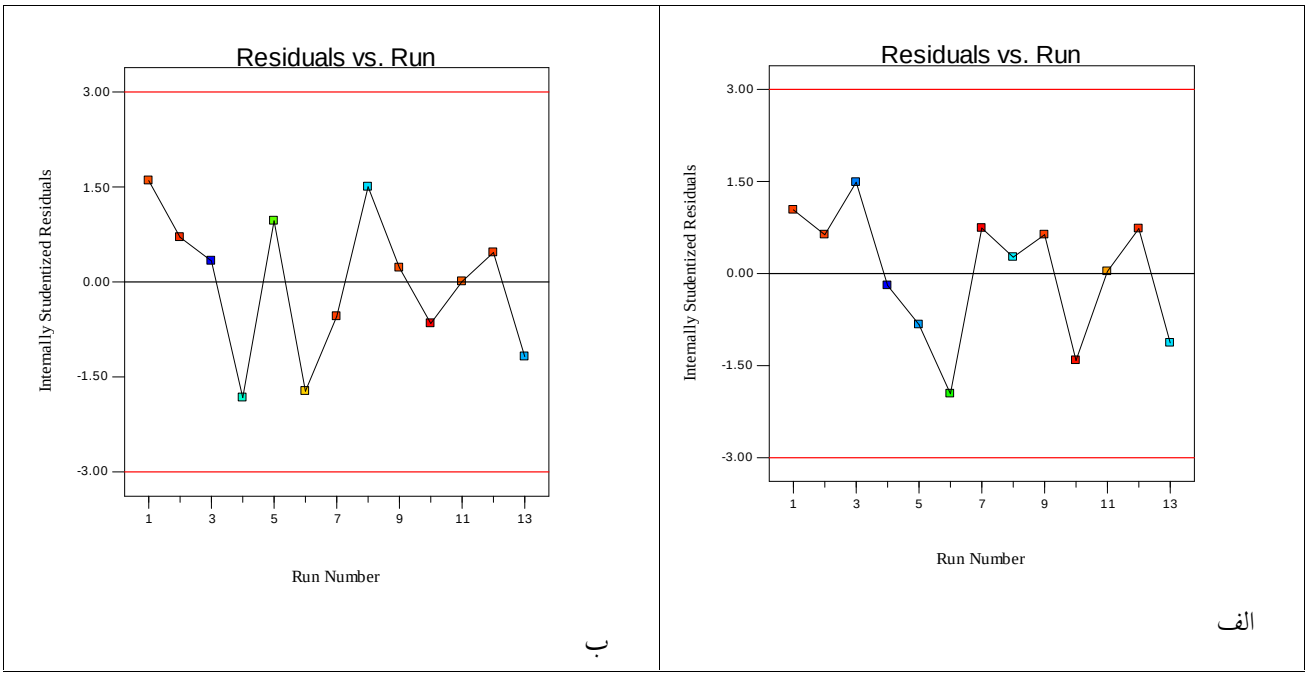
در صورتی که باقیمانده‌ها دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس ثابت بوده و همچنین باقیمانده‌ها مستقل باشند، تحلیل آزمایش‌ها و استفاده از مدل‌ها صورت می‌گیرد. یک نمودار احتمال نرمال، توزیع نرمال باقیمانده ها را نشان می‌دهد. بطوریکه نقاط روی یک خط مستقیم قرار می‌گیرند. اما حتی در داده‌های نرمال نیز اندکی پراکندگی وجود دارد. نمودار (٣) نمودارهای احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد. نمودار (٣-الف) و (٣-ب) بترتیب احتمال نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها درمورد کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی را نشان می‌دهند. همانطور که در این دو نمودار مشاهده می‌گردد، باقیمانده‌ها نسبت به توزیع، اندکی انحراف دارند. با این حال می‌توان فرض نمود که این دو نمودار دارای توزیع نرمال هستند.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]



نمودار ۳: پراکنش باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر برازش داده شده در مورد غیر فعال سازی الف: کل کلی فرم‌ها و ب: کلی فرم‌های مدفوعی.



نمودار ٤: پراکنش باقیمانده‌ها نسبت به ترتیب انجام آزمایش‌های غیرفعال سازی الف: کل کلی فرم‌ها و ب: کلی فرم‌های مدفوعی

نمودار (٤) پراکنش باقیمانده‌ها نسبت به ترتیب انجام آزمایشات و جمع آوری داده‌هاست، و برای بررسی استقلال بین باقیمانده‌ها بکار می‌رود. در صورت عدم مشاهده هر گونه روندی از قبیل سینوسی بودن در این نمودار، فرض استقلال داده‌های بدست آمده پذیرفته می‌شود. در این دو نمودار (٤-الف و ٤-ب) که به ترتیب مربوط به توالی آزمایشات کل کلی

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]

فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی است، هیچگونه روندی که بتوان فرض استقلال داده‌ها را رد کرد، مشاهده نمی شود. بنابراین با توجه به تحلیل نمودارهای الف و ب ارائه شده در نمودارهای (۳و٤)، مدل انتخاب شده برای تحلیل داده‌ها مناسب است. بنابراین مدل مرتبه دوم که برای بررسی ارتباط بین داده‌های بدست آمده و متغیرهای مستقل انتخاب شده است معتبر می‌باشد.

نتایج تحلیل واریانس عوامل مدل مرتبه دوم سطح پاسخ در غیر فعال سازی شاخص‌های آلودگی باکتریایی در جدول‌های (۳ و ٤) ارائه شده اند. با توجه به داده‌های موجود در این جداول، نقش کلیه عوامل مدل مرتبه دوم در غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی معنی دار است. ضریب هر یک از واژه‌های مدل نیز برای کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی در جدول (۵) ارائه شده است. بنابراین هیچ یک از این عوامل از مدل حذف نگردیدند. عواملی که در مدل دارای علامت مثبت هستند، در کاهش جمعیت شاخص‌های باکتریایی دارای اثرات مثبت بوده و عواملی که دارای علامت منفی اند دارای اثرات منفی در کاهش جمعیت شاخص‌های آلودگی باکتریایی شیرابه هستند. با توجه به داده‌های ارائه شده در جدول (۵) اثر عوامل زمان ماند و غلظت کلر و اثر واکنش‌های متقابل این دو عامل روی غیر فعال سازی مثبت است، اما اثرات توان دوم این عوامل در غیر فعال سازی شاخص‌های میکروبی منفی است. هرچه ضرایب عوامل تشکیل دهنده بزرگ تر باشد، نقش آن عوامل در غیر فعال سازی، مهم تر است. برای تحلیل گرافیکی اثرات بین متغیرهای مستقل سیستم و پاسخ، تحلیل واریانس انجام شد. آزمون ضعف برازش (Lack of fit) ، تغییرات داده‌ها را حول مدل برازش شده توصیف می‌نماید. اگر مدل بخوبی برازش نشده باشد، این آزمون معنی دار است. مقادیر بزرگ P value (بیش از ۰/۰۵) مربوط به ضعف برازش که در جداول (۳ و ٤) ارائه شده است، موید معنی دار نبودن آزمون ضعف برازش بوده و بر وجود همبستگی بین متغیرهای مستقل و پاسخ‌های فرایند دلالت دارد. شاخص‌های اصلی معنی دار بودن و کفایت مدل شامل مقدار F (نسبت تغییرات فیشر)، مقدار احتمال (Prob>F) و AP (Adequate precision) هستند[۲٤].

آزمون فیشر برای بررسی معنی دار بودن برازندگی مدل چند جمله ای بکار می‌رود. در حالی که واژه‌های مدل بر پایه احتمال (P Value) با سطح اطمینان ۹۵٪ و AP تخمین زده می‌شوند[۲۵]. AP، مقادیر پیش بینی شده در نقاط طراحی را با متوسط خطای پیش بینی مقایسه می‌کند. مقادیر AP بیش از ٤ نشان دهنده تمایز رابطه مدل درجه ۲ از سایر معادلات است[۲٦و۲۷]. مقدار AP بالاتر از ٤ در نتایج (جدول ٦) موید این است که مدل‌های پیش بینی کننده بدست آمده از طرح مرکب مرکزی را می‌توان در فضای طراحی فرایند بکار گرفت.

با توجه به جداول (۳ و ٤) اعتبار مدل مرتبه دوم تایید می‌گردد. زیرا در هر دو مدل Prob>F کمتر از ۰/۰۵ است. مقادیر احتمال هر واژه مدل، اثرات متقابل و اثرات درجه دوم نیز در جداول (۳ و ٤) ارائه شده است که در همه موارد مقادیر آنها در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی دار بوده اند. مقدار ضریب همبستگی(R^2) بین صفر و یک تغییر می‌کند. ضریب همبستگی برابر با یک یعنی اینکه مدل برگزیده شده همه داده‌های آزمایشی را برآورد می‌کند و R^2 برابر با صفر یعنی اینکه برآورد مدل کاملاً اشتباه است. برای اینکه یک مدل دارای توانایی خوبی برای برازش داده‌ها داشته باشد، لازم است که ۰/۸ و بالاتر از آن باشد[۲۵]. مقادیر R^2 ارائه شده در جدول (٦) نیز به معنی دار بودن مدل اشاره می‌کند. زیرا در هر دو مدل، مقدار R^2 بیشتر از ۰/۸ است. داده‌های دارای R^2 بزرگ، تایید کننده تطابق رضایت بخش داده‌های آزمایش بر مدل درجه ۲ است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]

جدول ۵: نتایج رگرسیون مدل سطح پاسخ برای غیر فعال سازی شاخص‌های باکتریایی در شیرابه با استفاده از کلر

واژه	ضریب	ضریب تخمین برای کل کلی فرم ها	ضریب تخمین برای کلی فرم‌های مدفوعی
ضریب ثابت	a_0	۷۲/٦٦	۸۹/۱۷
زمان تماس(A)	a_1	١٤	۱۹/٤۸
غلظت کلر(B)	a_2	۲۰/۳۳	۱۳/۵۵
A * B	a_3	۱۳/۷۵	۷/۷۷
A^2	a_4	-۱۵/۷۹	-۲۳/۷۵
B^2	a_5	-۱۵/۷۹	-۹/۷۵

با قرار دادن عوامل موثر در غیر فعال سازی شاخص‌های آلودگی باکتریایی در رابطه کلی مدل مرتبه دوم، رابطه (۲) حاصل شد. سپس برای تخمین ضرایب رگرسیون، بر روی داده‌های حاصل از انجام آزمایشات، آنالیز رگرسیون چندگانه صورت گرفت و ضرایب بدست آمده در رابطه (۱) قرار گرفت. بدین ترتیب رابطه (۲) برای غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها و رابطه (۳) برای غیر فعال سازی کلی فرم‌های مدفوعی بدست آمد. با توجه به اینکه کلیه واژه‌های معادلات (۲ و ۳) به لحاظ آماری (P Value<۰/۰۵) معنی‌دار بودند، بنابراین هیچکدام از واژه‌ها از معادلات فوق‌الذکر حذف نگردیدند. ضرایب بدست آمده برای هر یک از مدل‌ها با P Value مربوط به هرکدام از واژه‌ها در جدول (۵) ارائه شده اند.

رابطه (۲): راندمان غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها بر اساس ضرایب بدست آمده از مدل مرتبه دوم

Y=۷۲/٦٦ + ١٤ (Contact time) + ۲۰/۳۳ (Chlorine dose)+۱۳/۷۵ (Contact time× Chlorine dose) - ۱۵/۷۹ (Contact time)^2 - ۱۵/۷۹ (Chlorine dose)^2

رابطه (۳): راندمان غیرفعال سازی کلی فرم‌های مدفوعی بر اساس ضرایب بدست آمده از مدل مرتبه دوم

Y=۸۹/۰۷ + ۱۹/۵ (Contact time) +۱۳/۵ (Chlorine dose) + ۷/۷۵ (Contact time× Chlorine dose) - ۲۳/۷٤(Contact time)^2 - ۹/۷٤ (Chlorine dose)^2

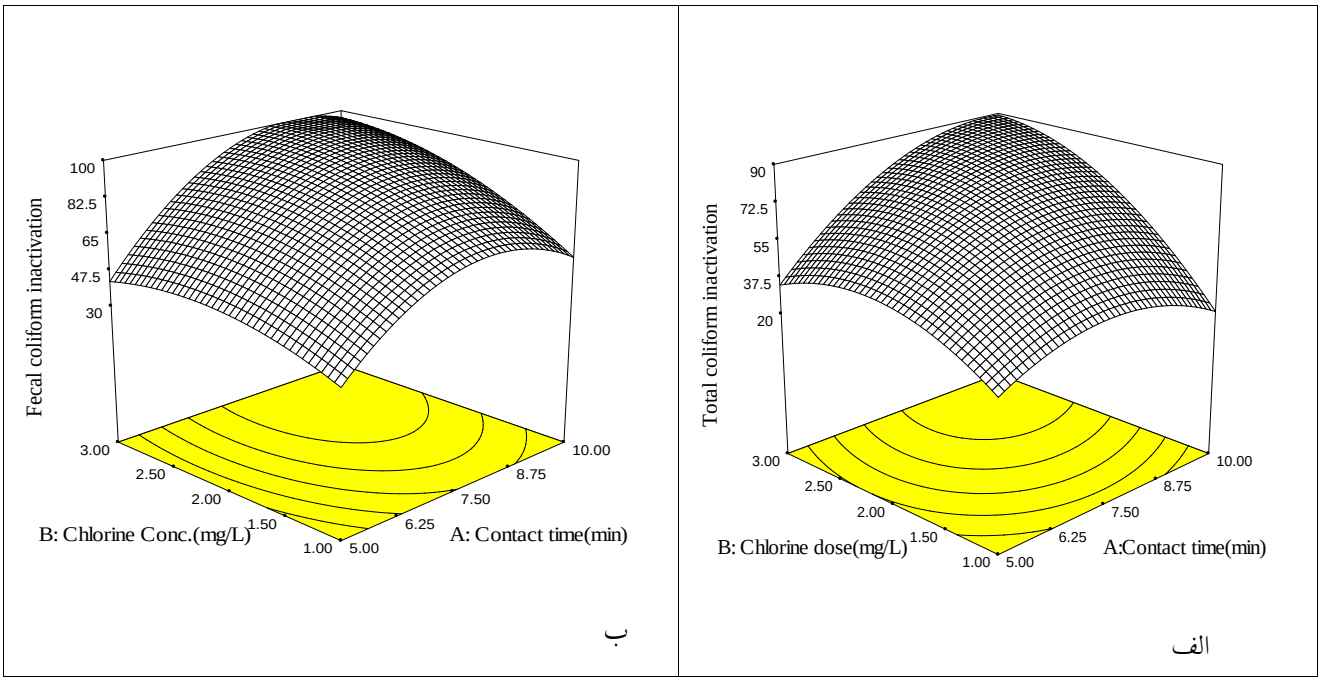
جدول ۶: نتایج آنالیز واریانس مدل مرتبه دوم برای غیر فعال سازی شاخص‌های باکتریایی با استفاده از کلر

نام پارامتر آماری	مقدار	
	کل کلی فرم ها	کلی فرم‌های مدفوعی
میانگین	۵۸/۰۸	۷۳/۷۱
انحراف معیار	۱۱/۰۳	٤/۵۷
ضریب تغییرات(٪)	۱۹	٦/۲
R-Squared	۰/۸۸٦۲	۰/۹۷۷٤
Adj R-Squared	۰/۸۰٤۹	۰/۹٦۱۳
Pred. R-Squared	۰/٤٤۸۱	۰/۸۵۸۰
Adequate Precision	۹/۱٦	۲۱/۲۸۵
PRESS	٤۱۳٤	۹۱۸/۵

PRESS; Predicted residual error sum of squares

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]



نمودار ۵: نمودار سه بعدی اثرات متقابل زمان تماس و غلظت کلر در غیر فعال سازی (الف) کل کلی فرم‌ها و (ب) کلی فرم‌های مدفوعی

برای مشاهده بهتر اثر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته (پاسخ ها) نمودارهای سه بعدی سطح پاسخ برای هر گروه از شاخص‌های مورد مطالعه رسم گردید. در نمودار (۵) اثر دو متغیر مستقل بر متغیر پاسخ بررسی شده است.

نمودار۵- الف، و ۵- ب، اثرات متقابل متغیرهای مستقل، غلظت کلر و زمان تماس در غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی را نشان می‌دهد.

همانگونه که در نمودار ۵- الف دیده می‌شود با افزایش غلظت کلر و زمان تماس، راندمان غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها افزایش می‌یابد. حداکثر غیر فعال سازی (۹۰٪) در زمان تماس ۱۰ دقیقه و غلظت کلر mg/L ۳ اتفاق می‌افتد. همچنین با توجه به نمودار ۵- ب، کلی فرم‌های غیر مدفوعی نسبت به کل کلی فرم‌ها حساسیت بیشتری در مقابل غلظت کلر و زمان تماس از خود بروز می‌دهند، بطوریکه بیشترین راندمان غیر فعال سازی (۱۰۰٪) در زمان تماس ۹ دقیقه و غلظت کلر mg/L ۳ بدست آمد. با توجه به اینکه واکنش‌های متقابل متغیرها معنی‌دار بودند (جداول٤ و ۳)، بنابراین انحناء، در نمودارهای سطح پاسخ سه بعدی کاملاً واضح است. هر یک از دو نمودار سطح پاسخ دارای یک نقطه اوج واضح هستند که نمایانگر اهمیت نقش متغیرهایی مثل زمان تماس و غلظت کلر در فراهم شدن شرایط برای غیر فعال سازی حداکثری شاخص‌های آلودگی باکتریایی است. با دور شدن از این نقاط اوج، کاهش راندمان غیر فعال سازی مشاهده می‌گردد، به طوری که افزایش و یا کاهش هر یک از متغیرهای مورد آزمایش مطلوب به نظر نمی رسد.

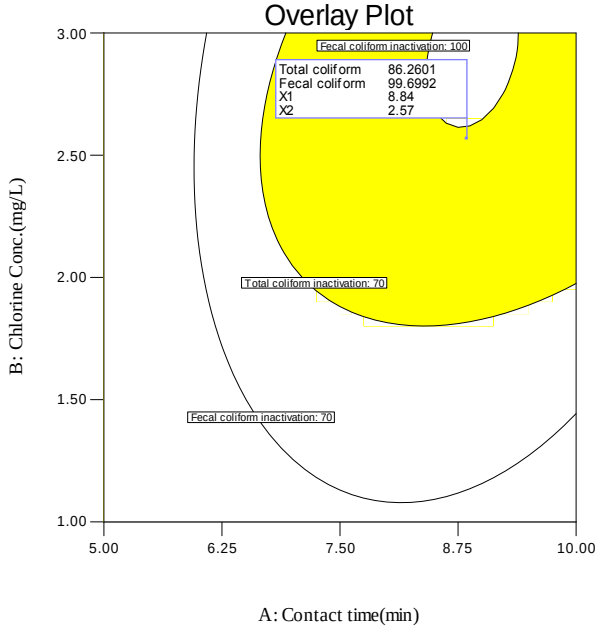
بهینه‌سازی شرایط آزمایش

بهینه سازی شرایط گندزدایی با کلر را می‌توان با استفاده از مدل‌های گوناگونی مثل مدل چیک و واتسون که نمودار ct را در مقابل لگاریتم غیر فعال سازی باکتریایی نشان می‌دهد، انجام داد. در مدل چیک و واتسون کلر باقیمانده بایستی در فواصل زمانی مناسبی اندازه گیری و در روی نمودار، کلر باقیمانده در برابر زمان تماس نوشته شود. در این مطالعه که با بکار گیری روش سطح پاسخ انجام شد، بدون نیاز به اندازه‌گیری کلر

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]

باقیمانده، امکان بکارگیری این روش برای ایجاد بهینه‌سازی عوامل مؤثر در گندزدایی، مورد ارزیابی قرار گرفت. نمودار روی هم گذاری شده (Overlay plot) برای تعیین شرایط بهینه گندزدایی بکار رفت. نتایج در نمودار (۵) ارائه شده است. متغیرهای مهم در فرآیند گندزدایی از قبیل زمان تماس و غلظت کلر در غیر فعال سازی دو گروه از شاخص‌های باکتریایی شامل کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی بطور معنی داری موثر بودند. عملکرد روش سطح پاسخ و مطلوبیت (Desirability)، بر اساس میزان غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی تعیین گردید. راندمان غیرفعال‌سازی باکتریایی و مقدار هر یک از دو متغیر مستقل در این ناحیه، در نمودار (٦) نشان داده شده است. مقادیر بهینه دو متغیر مستقل زمان تماس و غلظت کلر بترتیب برابر با ۹/۳۹min و ۲/۹۹mg/Lبودند. راندمان غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی در این شرایط، بترتیب ۸۹/۱٦٪ و ۱۰۰٪ بود، ضمن اینکه میزان مطلوبیت در این شرایط برابر با ۹۹٪ بود. برای تایید اعتبار مدل‌ها در پیش‌بینی شرایط بهینه و پایایی ناحیه بهینه بدست آمده توسط مدل‌ها، یک آزمایش اضافی دراین شرایط انجام شد که میزان غیرفعال سازی کل کلی‌فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی بترتیب ۸۸/۲٪ و ۹۹/۸٪ بود که نشان‌دهنده توافق خوب نتایج پیش بینی توسط مدل‌ها با نتایج واقعی حاصل از مطالعات آزمایشگاهی است. با مقایسه نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها مشاهده می‌گردد که روش سطح پاسخ یک ابزار مفید برای بهینه سازی متغیرهای مهم در فرایند گندزدایی شیرابه می‌باشد.



نمودار ۶: نمودار روی هم قرار گیری شرایط بهینه حذف شاخص‌های باکتریایی

نتیجه‌گیری

شیرابه مکان دفن پسماندهای شهری به دلیل دارا بودن جمعیت قابل توجهی از عوامل باکتریایی بیماری زا، تهدید بزرگی برای انسان و محیط زیست محسوب می‌گردد.

این گمان که شیرابه مکان دفن عاری از عوامل بیماری زا است، ممکن است درمورد مکان‌های دفن معینی واقعیت داشته باشد، اما در بسیاری از جایگاه‌های دفن صحت ندارد و به وضعیت جایگاه، نوع طراحی و وضعیت بهره برداری از جایگاه بستگی دارد. نتایج نشان داد که غلظت کلر و زمان تماس نقش مهمی در غیر فعال سازی عوامل باکتریایی دارند، بطوری که در زمان تماس و غلظت کلر بترتیب برابر با ۹/۳۹min و ۲/۹۹mg/L ، راندمان غیر فعال سازی کل کلی فرم‌ها و کلی فرم‌های مدفوعی بترتیب به ۸۹/۱٦٪ و ۱۰۰٪ رسید. بنابراین از کلر می‌توان برای گندزدایی شیرابه استفاده نمود. با این حال در صورت وجود بار آلی بالا در شیرابه، با توجه به پتانسیل ایجاد محصولات جانبی ناشی از کلر زنی، بایستی در انتخاب کلر به عنوان گندزدا ملاحظات بهداشتی و زیست محیطی لازم مد نظر قرار گیرد. همچنین بایستی مطالعات بیشتری در مورد انواع عوامل بیماری‌زای بیولوژیکی موجود در شیرابه و میزان بقای آنها در محیط انجام شود.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]

منابع

1. Aghamohammadi N, Aziz HA, Isa MH, Zinatizadeh AA. Powdered activated carbon augmented activated sludge process for treatment of semi-aerobic landfill leachate using response surface methodology. Bioresource Technol 2007;98(1): 3570-8.
2. Hester RE, Harrison RM. Electronic Waste Management: Royal Society of Chemistry; 2009.
3. Wang, Z.P., Zhang, Z., Lin, Y.J., Deng, N.S., Tao, T., Zhuo, K. Landfill leachate treatment by a coagulation-photooxidation process. J Hazard Mater 2002;95(9): 153-9.
4. Tizaoui C, Bouselmi L, Mansouri L, Ghrabi A. Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide systems. J Hazard Mater 2007;140(7): 316-24.
5. Mehmood AK, Adetutu E, Nedwell BD, Ball AS. In situ microbial treatment of landfill leachate using aerated lagoons. Bioresource Technol 2009;100(3): 2741-4
6. Guo J-S, Abbas AA, Chen Y-P, Liu Z-P, Fang F, Chen P. Treatment of landfill leachate using a combined stripping, Fenton, SBR, and coagulation process. J Hazard Mater 2010;178(1): 699-705.
7. Adeyeba OA, Akinbo JA. Pathogenic intestinal parasites and bacterial agents in solid wastes. E Afr Med J 2002,79(7): 604-10.
8. San Sebastian Martinez N, Figuls Fernandez J, Font Segura X, Sanchez Ferrer, A. Pre-oxidation of an extremely polluted industrial wastewater by the Fenton's reagent. J Hazard Mater 2003;101(6): 315-22.
9. Deng Y, Englehardt JD. Treatment of landfill leachate by the Fenton process. Water Res 2006;40(1): 3683-94.
10. Zhang H, Choi HJ, Huang CP. Optimization of Fenton process for the treatment of landfill leachate. J Hazard Mater 2005;125(4): 166-74.
11. Li HS, Zhou SQ, Sun YB, Feng P, Li JD. Advanced treatment of landfill leachate by a new combination process in a full-scale plant. J Hazard Mater 2009;172(9): 408-15.
12. Yoon J, Kim Y, Huh J, Lee Y, Lee D. Roles of oxidation and coagulation in Fenton process for the removal of organics in landfill leachate. J Ind Eng Chem 2002;8(3): 410-8.
13. Zhang L, Li AM, Lu YF, Yan L, Zhong S, Deng CL. Characterization and removal of dissolved organic matter (DOM) from landfill leachate rejected by nanofiltration. Waste Manage 2009; 29(11): 1035-40.
14. Calace N, Liberatori A, Petronio BM, Pietroletti M. Characteristics of different molecular weight fractions of organic matter in landfill leachate and their role in soil sorption of heavy metals. Environ Pollut 2001;113(1): 331-9.
15. He PJ, Xue JF, Shao LM, Li GJ, Lee DJ. Dissolved organic matter (DOM) in recycled leachate of bioreactor landfill. Water Res 2006;40(6): 1465-73.
16. Kang KH, Shin HS, Park H. Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications. Water Res 2002;36(5): 4023-32.
17. Zhang H, Choi HJ, Canazo P, Huang CP. Multivariate approach to the Fenton process for the treatment of landfill leachate. J Hazard Mater 2009;161(9): 1306-12.
18. Yang X, Shang C, Huang J. DBP formation in break point chlorination of wastewater. Water Res 2005;39(8): 4755-67.
19. Krbahti BK. Response surface optimization of electrochemical treatment of textile dye wastewater. J Hazard Mater 2007;145(2): 277-86.
20. APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed., American Public Health Association, Washington D.C., 2005.
21. Mason RL, Gunst RF, Hess JL. Statistical design and analysis of experiments, eighth applications to engineering and science. 2nd ed., Wiley, New York, 2003.
22. Mohajeri L, Aziz,HA, Isa MH, Zahed MA. A statistical experiment design approach for optimizing biodegradation of weathered crude oil in coastal sediments. Bioresource Technol 2010;101(10): 893-900.
23. Ray S, Lalman JA, Biswas N. Using the Box-Benkhen technique to statistically model phenol photocatalytic degradation by titanium dioxide nanoparticles. Chem Eng J 2009;150(1): 15-24.
24. Arslan-Alaton I, Tureli G, Olmez-Hanci T. Treatment of azo dye production wastewaters using Photo-Fenton-like advanced oxidation processes: optimization by response surface methodology. Photochem Photobio Chem A 2009;202(7): 142-53.
25. Ghafari S, Aziz HA, Isa MH, Zinatizadeh AK. Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation –flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum. J Hazard Mater 2009;163(6): 650-6.
26. Mason RL, Gunst RF, Hess JL. Statistical Design and Analysis of Experiments, Eighth Applications to Engineering and Science, 2nd ed., Wiley, New York, 2003.
27. Beg Q, Sahai V, Gupta R. Statistical media optimization and alkaline protease production from Bacillus mojavensis in a bioreactor. Process Biochem 2003;39(4): 203-9.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]

Optimization of Chlorination Process for Mature Leachate Disinfection Using Response Surface Methodology

Hamzeh Ali Jamali[1], Kavoos Dindarloo[2], Mehrdad Farrokhi[3*]

1. Department of Environmental Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

2. Department of Environmental Health, Hormozgan University of Medical Sciences, Bandar Abbas, Iran

3. Department of Environmental Health, Alborz University of Medical Sciences, Karaj, Iran

E-mail: *mfarokhikhb@yahoo.com*

Received: *23 Nov 2013* ***; Accepted:*** *12 Apr 2014*

ABSTRACT

Background: leachate from landfill contains high level of microbial pathogens which is considered as one of the most important threats for the environment. One of the common and simple methods for water and wastewater disinfection is chlorination, but it rarely has been used for leachate disinfection. The objective of this study was evaluating the efficiency of chlorine for leachate disinfection and optimization of the effect of concentration and contact time on the death of total and fecal coliforms, as a microbial contamination index.

Methods: In this descriptive-analysis study, microbial indices monitoring in leachates initiated from landfill of Qazvin city were conducted for one year. After pre-tests, the range of chlorine concentration and contact time on the inactivation of microbial indices were determined. Central composite design (CCD) and response surface methodology (RSM) were applied to optimize chlorine concentration and contact time parameters effect on microbial inactivation. 13 runs of tests were performed on samples. Tests were included BOD, COD, total and fecal coliforms. All analytical experiments were according to the standard methods for the examination of water and wastewater.

Results: Results of the study showed that microbial indices had relatively high sensitivity to inactivation by chlorination, which in the chlorine concentration of 2 mg/L and contact time of 9 min, and chlorine concentration of 0.5 mg/L and contact time of 12 min, 100% of total and fecal coliforms inactivated, respectively. The RSM method was used for analysis of bacterial inactivation. Analyses showed that in contact time of 9.4 min and chlorine concentration of 2.99 mg/L, the inactivation efficiency of total and fecal coliforms were 89.16% and 100%, respectively.

Conclusions: Chlorine could be used for leachate disinfection. However, in high concentrations of organic matter in leachates, due to production potential of chlorination by-products, health and environmental consideration must be considered in choosing chlorine as a disinfectant.

Key words: Leachate, Disinfection, Chlorination, Response Surface Methodology, Modeling.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.3.157]