

تصفیه فیزیکی-بیولوژیکی فاضلاب حاوی بار آلی زیاد (شیرابه)

علی پیروزی^۱، امین شیرزاد^۲

^۱ استادیار مهندسی شیمی دانشگاه علم و فناوری مازندران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه علم و فناوری مازندران

نام و نشانی ایمیل نویسنده مسئول:

امین شیرزاد

aminshirzad.m@gmail.com

چکیده

امروزه دفن بهداشتی رایج ترین رویکرد برای دفع زباله های جامد شهری است، اما یک عیب عمده آن تولید مایع به شدت آلوده (شیرابه) می باشد. شیرابه مایعی است که از میان زباله جامد در یک لندفیل خارج می گردد. شیرابه محل دفن زباله حاوی غلظت بالای COD و BOD بوده و عموماً از مواد نامطلوب مانند آلاینده های آلی و معدنی، مواد زائد خطرناک و فلزات سنگین تشکیل شده است. این شیرابه ها قبل از تخلیه به محیط باید به طور مناسب تصفیه شوند. به طور کلی، ویژگی های شیرابه مانند COD، BOD/COD و سن دفن زباله از عوامل تعیین کننده ضروری برای انتخاب فناوری های تصفیه مناسب هستند. در سال های اخیر استفاده از روش های تلفیقی توسعه چشمگیری داشته است. در این پژوهش نیز از روش ترکیبی فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی برای تصفیه شیرابه مرکز دفن استفاده شده است. هدف از این پژوهش بررسی تاثیر کربن فعال، لجن فعال و جلبک کلرولولگاريس بر کارایی تصفیه شیرابه حاصل از کارخانه کمپوست بهشهر است. به منظور انجام این طراحی آزمایش و یافتن مقادیر بهینه پاسخ ها، از نرم افزار Design Expert استفاده شد. برای انجام آزمایش ها، از ارلن های یک لیتری و پمپ هوادهی استفاده شد. به هر ارلن مطابق طراحی آزمایش صورت گرفته، شیرابه، کربن فعال، لجن فعال و جلبک اضافه گردید، سپس مطابق روش آزمایشگاهی هریک از مقادیر پاسخ اندازه گیری شدند. کمترین مقدار COD، BOD، نیترات و فسفات به ترتیب برابر ۵۵، ۲۶، ۱/۴ و ۱۳ میلی گرم بر لیتر به دست آمده است. از نتایج بدست آمده می توان نتیجه گرفت که فرایند تلفیقی فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی در مقایسه با فرایند بیولوژیکی مجزا، توانایی بالاتری در کاهش مقادیر COD، BOD، نیترات و فسفات شیرابه دارد.

واژگان کلیدی: شیرابه، مراکز دفن زباله، کربن فعال، لجن فعال، جلبک، کلرولولگاريس.

مقدمه

بالا رفتن روز افزون سطح زندگی، رشد صنعتی و تجاری در بسیاری از کشورها در سراسر جهان در دهه گذشته سبب افزایش سریع مواد زائد جامد شهری (MSW) و صنعتی شده است.

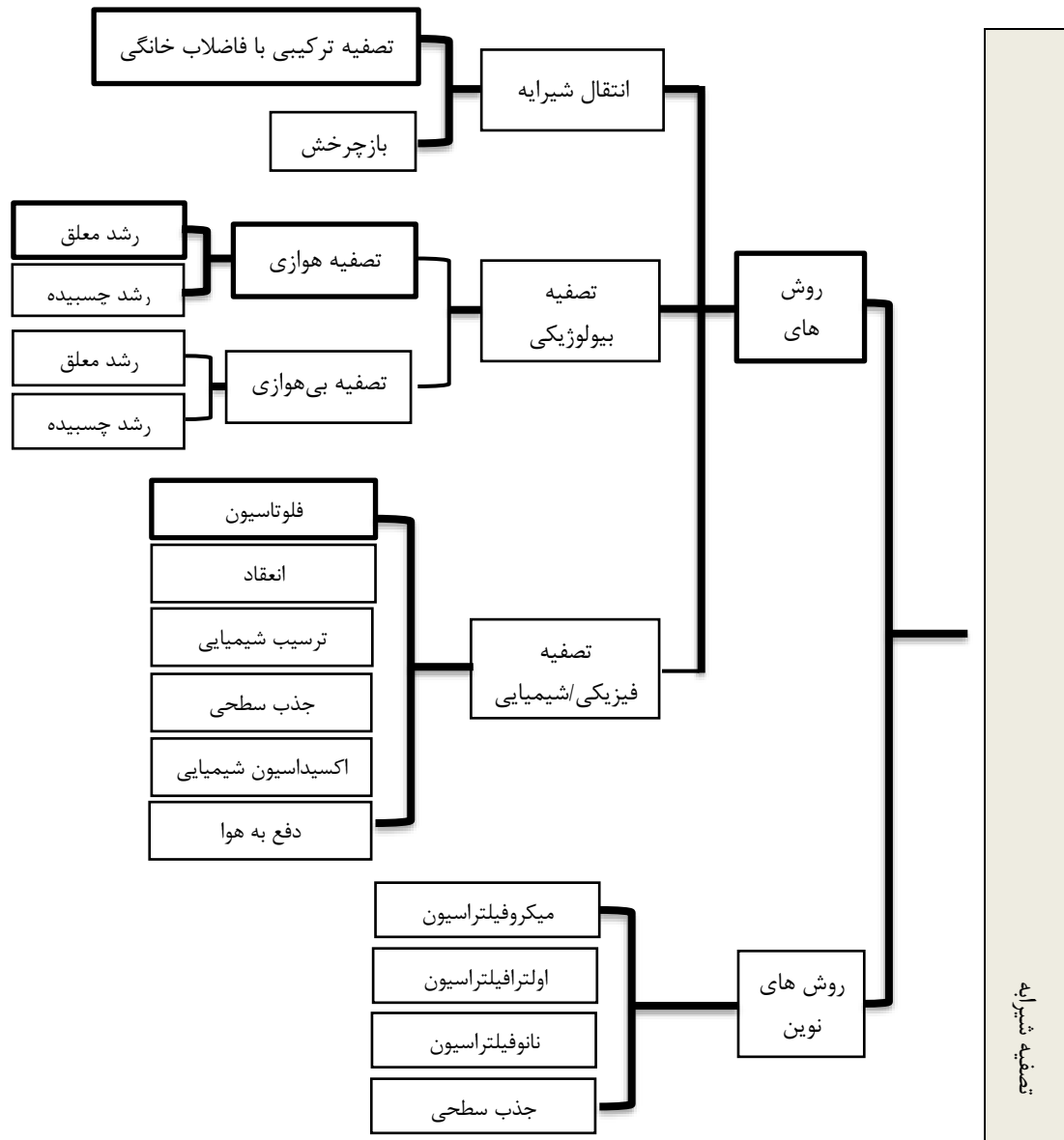
روش دفن بهداشتی زباله برای دفع نهایی مواد زائد جامد به دلیل مزایای اقتصادی آن هم چنان به طور گسترده استفاده می‌شود. مطالعات مقایسه‌ای با روش‌های مختلف برای دفع مواد زائد جامد شهری (دفن، سوزاندن، کمپوست و...) نشان داده‌اند که ارزان‌ترین گزینه، در مدت بهره‌برداری و با توجه به هزینه‌های سرمایه، دفن مواد زائد جامد است.

شیرابه فاضلابی قوی، بد بو و به رنگ قهوه‌ای مایل به تیره است که از تجزیه بخش آلی پسماندها در اثر فرایندهای فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی در ترکیب با آب باران تولید می‌گردد، خصوصیات آن بسته به حجم و نوع پسماند تولیدی، جمعیت میکروبی، درجه تثبیت، ساختار هیدرولیکی مکان دفن، شرایط اقلیمی و بهره‌برداری، سن و مراحل تجزیه متفاوت است [1,2]. خصوصیات شیرابه محل دفن، معمولاً توسط پارامترهای اساسی COD، BOD، BOD/COD، pH، مواد جامد معلق (SS)، نیتروژن آمونیاکی (NH₃-N) و فلزات سنگین بیان می‌شود. جدول ۱ خلاصه‌ای از مقادیر برخی پارامترهای اصلی تعیین‌کننده کیفیت شیرابه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است؛ ترکیب شیرابه محل‌های دفن بهداشتی مختلف، دارای تنوع گسترده‌ای است. این داده‌ها نشان می‌دهند که سن محل دفن زباله و در نتیجه تثبیت مواد زائد جامد تاثیر مستقیمی بر خصوصیات آن دارد.

جدول ۱- مقادیر ($\frac{mg}{L}$) هر یک از پارامترهای تعیین‌کننده کیفیت شیرابه

منبع	NH ₃ -N	SS	pH	BOD/COD	BOD	COD	محل دفن	سن
[3]	۴۲	-	۵/۸	۰/۷	۹۶۶۰	۱۳۸۰۰	کانادا	جوان
[4]	۵۲۱۰	۱/۶۶۶	۸/۲	۰/۲۲	۲۳۰۰	۱۰۵۴۰	ایتالیا	جوان
[5]	۱۳۳۰	-	۸/۳۸	۰/۲۵	۱۲۷۰	۵۰۵۰	ایتالیا	متوسط
[6]	۷۴۳	-	۸	۰/۲۸	۳۳۱	۱۱۸۰	هلند	متوسط
[7]	۸۰۰	-	۸/۲۰	۰/۰۴	۱۵۰	۳۴۶۰	برزیل	قدیمی
[8]	۴۳۰	۱۳۰	۷/۵۰	۰/۰۱	۷/۱	۵۰۰	فرانسه	قدیمی

شیرابه‌های تولیدی ضمن نفوذ به خاک منجر به آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌گردد [9]. بنابراین به منظور جلوگیری از نشر آلودگی و رعایت استانداردهای دقیق تخلیه، اجرای روش‌های مطلوب تصفیه شیرابه امری ضروری تلقی می‌گردد [10]. در همین راستا، پس از تعیین کامل خصوصیات شیرابه، روش‌های تصفیه کارآمد بایستی شناسایی و به کار گرفته شوند [11]. روش‌های مختلف تصفیه شیرابه شامل روش‌های بیولوژیک، فیزیکی-شیمیایی و انتقال شیرابه می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱- نمایی کلی از مجموعه روش های تصفیه

با توجه به این که کیفیت شیرابه از یک لندفیل به لندفیل دیگر و در طول زمان با توجه به سن لندفیل تغییر می کند، هیچ یک از روش های بیولوژیکی یا شیمیایی به تنهایی نمی توانند به راندمان حذف بالایی دست یابند، به همین دلیل برای دستیابی به استانداردهای سخت گیرانه تخلیه زباله در کشورهای مختلف، انواع مختلفی از روش های تصفیه شیرابه های دفن زباله از جمله تکنیک های بیولوژیکی و فیزیکی- شیمیایی و همچنین ترکیبی از آنها مورد بررسی قرار گرفته اند. [12,13] فرایندهای تصفیه بیولوژیکی (هوازی یا بی هوازی) به دلیل سادگی، قابلیت اطمینان و مقرون به صرفه بودن معمولاً برای تصفیه عمده شیرابه های حاوی غلظت های بالا از مواد آلی استفاده می شوند [14].

طبق تحقیقات مختلف ثابت شده است که تصفیه های فیزیکی- شیمیایی نه تنها برای حذف مواد غیر قابل تجزیه بیولوژیکی از شیرابه تثبیت شده است، بلکه به عنوان یک مرحله تصفیه برای شیرابه تصفیه شده بیولوژیکی نیز مناسب است [15]. علاوه بر این، ترکیبی از تصفیه های بیولوژیکی و فیزیکی-شیمیایی می تواند به افزایش راندمان حذف بسیاری از آلاینده ها مانند فلزات سنگین، COD، BOD و نیتروژن آمونیاکی دست یابد [16].

معمولا زمانی که شیرابه تازه است، تکنیک های بیولوژیک، به علت وجود COD و $\text{NH}_3\text{-N}$ و فلزات سنگین عملکرد مناسب تری دارند و زمانی که شیرابه پایدارتر و درجه تجزیه پذیری ترکیبات آن پایین تر است، روش های تصفیه فیزیکی و شیمیایی مناسب تر هستند. عملکرد هر یک از این فرایندها می توانند با استفاده از پارامترهای کلیدی BOD، COD، BOD/COD، دوز اکسیدکننده ها ارزیابی شود.

هدف از این مقاله، کاهش COD، BOD، غلظت نیترات و غلظت فسفات شیرابه با استفاده از تصفیه به روش فیزیکوشیمیایی-بیولوژیکی می باشد.

پیشینه تحقیقات صورت گرفته

روش های تصفیه شیرابه به ترکیبات موجود در شیرابه، سن لندفیل و هیدرولوژی مکان وابسته هستند. روش های کاربردی تصفیه شیرابه شامل روش های تصفیه شیمیایی / فیزیکی و بیولوژیکی می شود. به دلیل دشواری در دست یافتن به بازدهی رضایت بخش در تصفیه به کمک یک روش، ترکیبی از روش های فیزیکی، شیمیایی و روش های بیولوژیکی برای تصفیه شیرابه لندفیل به کار گرفته می شود.

Aziz و همکاران کربن فعال پودری (PAC^1) را در راکتور SBR^2 به منظور تصفیه شیرابه مکان دفن مورد بررسی قرار دادند، بررسی ها نشان داد که PAC به عنوان جاذب علاوه بر افزایش راندمان حذف آلاینده های شیرابه، سبب افزایش اکسیژن محلول و کاهش میزان هوای مورد نیاز داخل راکتور می گردد [۱۷].

Ying و همکاران دریافتند که استفاده از PAC در ترکیب با راکتور SBR به طور قابل توجهی میزان تصفیه پذیری شیرابه را افزایش داد و هزینه های تصفیه سیستم در مقایسه با کربن فعال گرانولی (GAC^3) و یا دیگر روش های بیولوژیکی ترکیبی بسیار پایین تر بود [۱۸].

نتایج مطالعه Aziz و همکاران نشان داد که فرایند تلفیقی PAC-SBR در مقایسه با NPAC-SBR (بدون کاربرد پودر کربن فعال) تاثیر قابل ملاحظه ای در حذف آلاینده ها دارد، به طوری که در شرایط بهینه سرعت هوادهی $1\text{L}/\text{min}$ و زمان تماس $5/5\text{h}$ و مقدار PAC، 10 گرم بر لیتر ، راندمان حذف COD (غلظت اولیه $1655\text{mg}/\text{L}$) $64/1\%$ درصد به دست آمد [۱۹].

افزودن پودر کربن فعال به لجن فعال باعث افزایش ظرفیت جذب نسبت به لجن فعال متعارف می شود. این فرایند ترکیبی منجر به حذف $99/7\%$ از COD می گردد اما هنوز استانداردهای تخلیه برآورده نشده است [۲۰].

شانی زو و همکاران در سال ۲۰۱۸، به مقایسه سه سیستم تصفیه ناپیوسته مختلف (فقط لجن فعال، فقط کشت میکروجلبک کلرولوگاریس و کشت همزمان لجن فعال و کلرولوگاریس) در راکتور PBR^4 ۱ لیتری پرداختند که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. ضمنا پارامترهای کیفی فاضلاب در جدول ۲ ارائه شده است [۲۱]:

جدول ۲- پارامترهای کیفی فاضلاب

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	COD	$1130\text{mg}/\text{L}$
۲	TP	$28/5\text{mg}/\text{L}$
۳	pH	۷/۷
۴	COD/N	۰/۷۵
۵	$\text{NH}_3\text{-N}$	$260\text{mg}/\text{L}$
۶	TOC	$285\text{mg}/\text{L}$

¹ Powdered Activated Carbons

² Sequencing Batch Reactor

³ Granular Activated Carbons

⁴ Packed bed reactor

جدول ۳- نتایج پژوهش شانی زو و همکاران

نوع سیستم	درصد حذف نیتروژن	درصد حذف فسفر	درصد حذف COD
لجن	۳۳	۲۶/۷	۸۵
جلبک	۷۷/۱	۱۰۰	۸۰
کشت همزمان لجن و جلبک	۷۵/۵	۱۰۰	۸۵

روند عملیاتی (روش آزمایشگاهی)

در این پژوهش برای انجام آزمایش ها، از ۱۹ ارلن ۱ لیتری و پمپ هوادهی آکواریوم HAILEA مدل AC5505 با دبی خروجی ۵/۵ لیتر بر دقیقه مورد استفاده قرار گرفت. به هر ارلن مطابق طراحی آزمایش صورت گرفته، به اندازه ۱ لیتر شیرابه و جلبک، لجن فعال، کربن فعال اضافه گردید، ضمنا برای جداسازی ذرات جامد معلق از شیرابه، شیرابه به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ با سرعت چرخش ۷۰۰۰ قرارداده شد.

شکل ۲ نمایی از این تجهیزات آزمایشگاهی را نشان می دهد. برای تامین اکسیژن مورد نیاز جهت حذف BOD و COD نمونه های داخل ارلن و نیز ایجاد اختلاط لازم، هر ارلن با شدت ۱/۵ لیتر بر دقیقه هوادهی شد. نحوه هوادهی به این صورت بوده که نمونه ها از لحظه صفر هوادهی به مدت ۳ ساعت هوادهی شده و پس از آن به مدت ۳۰ دقیقه هوادهی قطع می شد تا اجزای نمونه هم چون ریزجلبک، لجن و کربن فعال، در طول این بازه بطور کامل ته نشین شوند. سپس نمونه گیری انجام شده و مقادیر شاخص های هدف اندازه گیری شد. پس از هر مرحله مجددا هوادهی برای ۳ ساعت متمادی دیگر آغاز و اندازه گیری ها انجام می شد. معمولا برای هر ارلن این فرآیند ۲ روز به طول انجامیده است. مقادیر غلظت نترات ($[NO_3^-]$) و فسفات ($[PO_4^{3-}]$) برای هر ارلن فقط در آخرین نمونه برداری اندازه گیری شده است.



شکل ۲- نمونه ای از سامانه آزمایشگاهی این پژوهش

لجن فعال استفاده شده در این مطالعه از تصفیه خانه شهرستان ساری تهیه شده است. لجن تهیه شده مربوط به مرحله مقدماتی تصفیه فاضلاب بوده است که در یکی از روزهای تابستان برداشت انجام شده است.

هم چنین شیرابه مورد استفاده در این مطالعه از کارخانه کمپوست شهرستان بهشهر (واقع در جاده زاغمرز) در یکی از روزهای تابستان تهیه شده است. این شیرابه از خروجی حوضچه تصفیه مرحله ثانویه (بنا به اظهارات شاغلین تصفیه خانه، از هیچ تصفیه پیشرفته و کلر زنی در آن استفاده نشده است) تامین گردید.

جدول ۴ مشخصات اولیه شیرابه نمونه گیری شده را نشان می دهد. نمونه گیری از این استخرها طی سه دفعه صورت گرفته است و نتایج ارائه شده در جدول میانگین سه بار سنجش شاخص ها می باشد.

جدول ۴ - مشخصات شیرابه خام

مشخصات شیرابه خام			
[PO ₄ ³⁻] (mg/L)	[NO ₃ ⁻] (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)
۴۳	۳۹	۴۶۰	۱۴۰۰

طراحی آزمایش

برای بررسی اثر پارامترهای غلظت ریزجلبک، کربن فعال و لجن فعال بر رفتار شاخص های COD، BOD، غلظت نیترات ([NO₃⁻]) و غلظت فسفات ([PO₄³⁻]) از یکی از روش های ترکیبی به نام سطح پاسخ (RSM) استفاده شد. به منظور انجام این طراحی آزمایش و یافتن مقادیر بهینه COD و BOD، غلظت نیترات و فسفات از نرم افزار Design Expert نسخه ۱۳ استفاده شد. در این طراحی ۵ سطح مختلف برای انجام آزمایشها مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شد:

جدول ۵. طراحی آزمایش انجام شده براساس سطح پاسخ

سطح	کربن فعال (گرم بر لیتر)	ریزجلبک (درصد حجمی)	لجن فعال (درصد حجمی)
۱	۰/۵	۷/۵	۷/۵
۲	۲	۱۵	۱۵
۳	۳/۵	۲۲/۵	۲۲/۵
۴	۵	۳۰	۳۰
۵	۶/۵	۳۷/۵	۳۷/۵

بحث و نتیجه گیری

اثر سه متغیر لجن فعال، کربن فعال و ریزجلبک بر مقادیر پاسخ

به منظور بررسی جامع و کنترل حد و مرزهای این پژوهش، طراحی آزمایش بر اساس سه عامل جلبک، لجن و کربن فعال در غلظت های مختلف آنها انجام شده است. بر اساس این ۳ عامل و ۵ سطح غلظتی در نظر گرفته شده، تعداد ۱۹ آزمایش طراحی و استخراج شده است. در این جا به منظور مطالعه و بررسی رفتار فرایند تصفیه، مقادیر COD، BOD، [NO₃⁻]، [PO₄³⁻] به عنوان پاسخ به تغییر عوامل موثر، مورد بررسی و سنجش قرار گرفته اند. ضمناً مقدار COD، در بازه های زمانی ۳ ساعته تا سقف ۲۱ ساعت و سه پاسخ دیگر در ابتدا و انتهای آزمایش اندازه گیری شده اند. آزمایش های طراحی شده به همراه پاسخ های آنها، در جدول ۶ ارائه شده است.

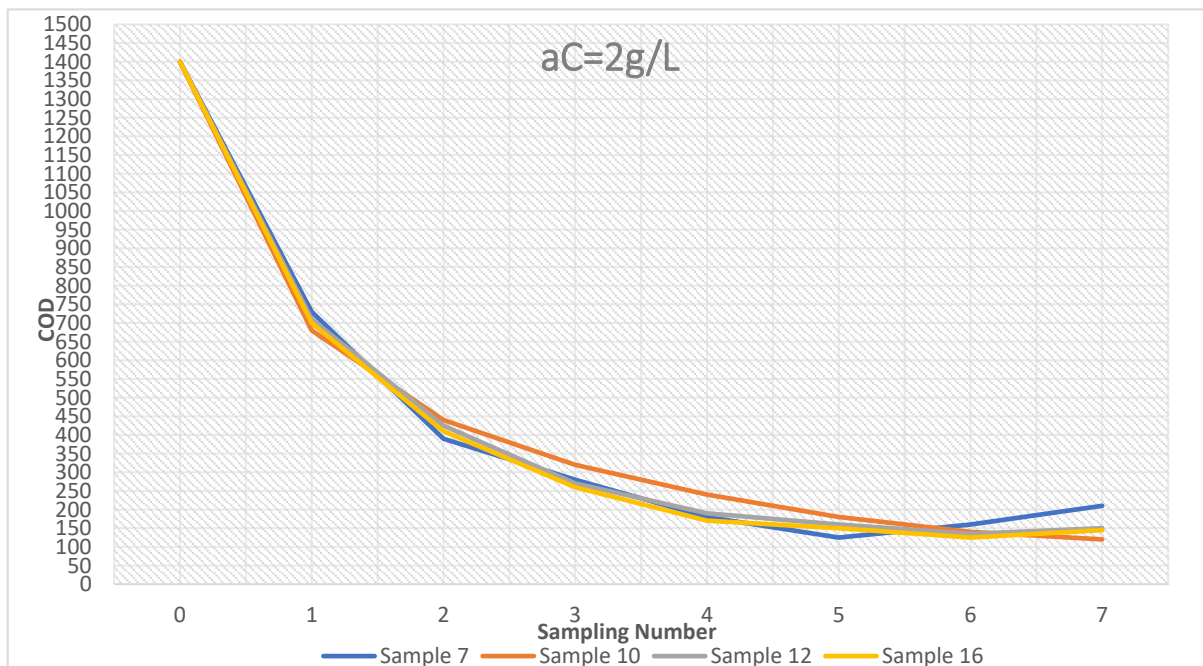
جدول ۶- آزمایش های طراحی شده در نرم افزار Design Expert و مقادیر پاسخ ها

ردیف	عوامل متغیر			پاسخ به تغییر						
	a ₅ (V/V)%	a ₄ (V/V)%	a _c g/L	COD mg/L						
				T=۲۱	T=۱۸	T=۱۵	T=۱۲	T=۹	T=۶	T=۳
۱	۲۲/۵	۲۲/۵	۳/۵	۱۷۵	۱۴۵	۱۲۰	۱۹۰	۲۸۰	۴۱۰	۵۸۰
۲	۱۵	۳۰	۵	۱۴۰	۱۱۰	۹۰	۱۳۰	۱۷۰	۲۷۰	۴۶۰
۳	۳۰	۱۵	۵	۱۳۰	۱۱۰	۹۵	۱۴۰	۱۹۰	۲۸۰	۴۷۰
۴	۷/۵	۲۲/۵	۳/۵	۲۰۰	۱۶۵	۱۴۰	۱۸۰	۲۷۰	۴۰۰	۵۶۰
۵	۳۰	۳۰	۵	۱۵۵	۱۱۰	۸۵	۱۲۰	۱۵۰	۲۷۰	۵۰۰

۲۲	۱/۴	۳۷	۸۰	۸۰	۹۰	۱۰۵	۱۳۰	۱۶۰	۲۴۰	۴۲۰	۵	۱۵	۱۵	۶
۲۰	۱/۶	۵۸	۱۲۵	۲۱۰	۱۶۰	۱۲۵	۱۸۰	۲۸۰	۳۹۰	۷۳۰	۲	۳۰	۳۰	۷
۱۸	۷/۱	۵۶	۱۲۰	۱۷۵	۱۴۵	۱۲۰	۱۹۰	۲۸۰	۴۱۰	۵۸۰	۳/۵	۲۲/۵	۲۲/۵	۸
۲۳	۱۰	۵۰	۱۱۰	۱۴۰	۱۱۰	۱۶۰	۲۵۵	۳۷۵	۵۴۰	۷۶۰	۰/۵	۲۲/۵	۲۲/۵	۹
۲۲	۴/۳	۵۶	۱۲۰	۱۲۰	۱۴۰	۱۸۰	۲۴۰	۳۲۰	۴۴۰	۶۸۰	۲	۱۵	۱۵	۱۰
۱۸	۷/۱	۵۶	۱۲۰	۱۷۵	۱۴۵	۱۲۰	۱۹۰	۲۸۰	۴۱۰	۵۸۰	۳/۵	۲۲/۵	۲۲/۵	۱۱
۲۲	۶/۵	۶۲	۱۳۵	۱۵۰	۱۳۵	۱۶۰	۱۹۰	۲۷۰	۴۲۵	۷۱۰	۲	۳۰	۱۵	۱۲
۲۳	۱۲/۳	۶۳	۱۳۵	۱۸۰	۱۶۰	۱۳۵	۲۰۰	۲۹۰	۴۱۰	۵۵۰	۳/۵	۷/۵	۲۲/۵	۱۳
۱۷	۱۲	۵۶	۱۲۰	۱۹۰	۱۵۰	۱۲۰	۱۷۰	۲۶۰	۴۰۰	۶۱۰	۳/۵	۲۲/۵	۳۷/۵	۱۴
۱۹	۷/۱	۵۰	۱۱۰	۱۸۵	۱۴۰	۱۱۰	۱۵۰	۲۳۰	۳۸۰	۶۳۰	۳/۵	۳۷/۵	۲۲/۵	۱۵
۲۰	۲۶/۵	۵۹	۱۲۵	۱۴۵	۱۲۵	۱۵۰	۱۷۰	۲۶۰	۴۱۰	۷۰۰	۲	۱۵	۳۰	۱۶
۱۸	۷/۱	۵۶	۱۲۰	۱۷۵	۱۴۵	۱۲۰	۱۹۰	۲۸۰	۴۱۰	۵۸۰	۳/۵	۲۲/۵	۲۲/۵	۱۷
۱۸	۷/۱	۵۶	۱۲۰	۱۷۵	۱۴۵	۱۲۰	۱۹۰	۲۸۰	۴۱۰	۵۸۰	۳/۵	۲۲/۵	۲۲/۵	۱۸
۱۳	۴/۴	۲۶	۵۵	۱۲۵	۸۰	۵۵	۱۰۰	۱۵۰	۲۱۰	۳۲۰	۶/۵	۲۲/۵	۲۲/۵	۱۹

تحلیل و بررسی پاسخ‌ها

تحلیل تاثیر تغییرات میزان جلبک، لجن و کربن فعال بر COD بر حسب زمان
 شکل ۳ نتایج مجموعه آزمایش‌های سطح ۲ کربن فعال ($a_c=2g.L^{-1}$) را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تغییرات COD در طول آزمایش در سطح دوم کربن فعال

همان گونه که در شکل ۳ مشخص است؛ طی ۳ ساعت ابتدایی آزمایش، مقدار COD حدوداً ۵۰٪ کاهش یافته است اما در همین محدوده زمانی هرچه غلظت میکروارگانیسم‌ها بیشتر می‌شود مقدار COD بیشتر است، این می‌تواند به دلیل تغییر محیط کشت و ایجاد فاز تاخیر در مرحله رشد سلول‌های ریزجلبکی باشد. به همین دلیل در ۳ ساعت اولیه، نمونه‌ای که در آن غلظت جلبک بیشتر است (Sampling 7) مقدار COD بالاتری نسبت به بقیه نمونه‌ها دارد. کاهش شدید رخ داده در ۳ ساعت اولیه برای همه نمونه‌ها می‌تواند ناشی از جذب فیزیکی آلاینده‌ها توسط کربن فعال باشد. در ساعات ابتدایی آزمایش به دلیل آزاد بودن سایت‌های جذب کربن فعال و دوری از حالت اشباع بیشترین فعالیت این جاذب فیزیکی مشاهده می‌شود.

حداقل میزان COD به دست آمده در سطح ۲ کربن فعال ($a_c=2g/L$) معادل 120 mg/L است، که در برداشت هفتم (۲۱ ساعت پس از شروع آزمایش) آزمایش ۱۰ (Sampling 10) جدول ۳ مشاهده شده است.

همان طور که مشخص است، در برداشت سوم آزمایش (۹ ساعت پس از شروع آزمایش) عمده آلاینده های دارای قابلیت جذب سطحی، جذب کربن فعال شده اند. به این ترتیب از این ساعت به بعد ظرفیت جذب کاهش یافته و به نظر می رسد کربن فعال به حالت اشباع نزدیک می شود. از این پس، نقش حضور ریزجلبک و لجن فعال برجسته تر شده و جذب بیشتر مواد آلی و کاهش میزان حذف COD در شیرابه مشاهده شده است.

ضمناً با توجه به شکل ۳، با افزایش غلظت ریزجلبک و لجن فعال، تاحدی زمان رسیدن به حداقل میزان COD کوتاه تر شده است. (یعنی در نمونه ای که غلظت بالاتری از میکروارگانیسمها وجود دارد، سریع تر حداقل میزان COD به دست آمده است.) هرچند غلظت ریزجلبک از لجن فعال در میزان کاهش COD موثرتر است.

پس از سازگاری سلولهای ریزجلبک با منابع رشد موجود در شیرابه، روند تغییرات COD برای غلظت های بالاتر میکروارگانیسمها کاهشی تر است. در واقع ریزجلبک پس از ورود به محیط شیرابه باید منابع تغذیه ای جدید را از میان آلاینده های آلی موجود در آن، برای رشد خود انتخاب نماید. این فرایند اندکی با تاخیر همراه است. با گذشت زمان و رشد میکروارگانیسمها این منابع مصرف شده و مقدار مواد آلی و گلوکز در شیرابه کم می شود. این کمبود مواد مغذی به تدریج رشد میکروارگانیسمها را کندتر نموده و روند کاهشی مقادیر COD را کم کرده تا جایی که در برداشت های نهایی، مقدار COD نسبتاً ثابت شده است. از این زمانها به بعد کمبود موادغذایی سبب لیز شدن سلولها شده و به اصطلاح در سامانه پدیده خودخوری اتفاق می افتد. مرگ سلولی به سبب ورود محتویات درون سلولی به محیط شیرابه، سبب اندک افزایش مقدار COD در ساعت های پایانی آزمایش شده است.

مقدار کاهش COD در سطوح دیگر کربن فعال هم این گونه مانند همین سطح کربن فعال قابل توجه است. البته شایان ذکر است که، افزایش غلظت کربن فعال، سبب کاهش شدیدتر مقدار COD در ساعات اولیه می شود.

جدول ANOVA

در طراحی آزمایش، به دلیل این که فقط بخشی از آزمایشها انجام می گیرد، باید از نتایج اطمینان یافت. آنالیز واریانس روش استاندارد آماری است که داده ها را از نظر کمی و کیفی بررسی می کند و میزان معنی دار بودن تاثیر هر فاکتور را بر پاسخ بررسی می کند. در این روش، تحلیل اطلاعات به صورت مستقیم انجام نمی گیرد و فقط با تحلیل و بررسی تغییرات داده ها، درجه اطمینان محاسبه می شود. هدف اصلی از این آنالیز، استخراج واریانس هر یک از فاکتورها نسبت به واریانس کل است [۱۷].

تحلیل های آماری انجام می شود تا مشخص شود که داده ها از چه نوع منحنی رگرسیونی تبعیت می کنند. در این مطالعه، مدل مرتبه دوم^۱ داده ها را به شکل مناسب تری برازش می کند.

نتایج تحلیل واریانس داده های این آزمایش برای پاسخ ها، در جدول ۵ نشان داده شده است. طبق این جدول، اگر مقدار p هر پارامتر کمتر از ۰/۰۵ باشد، پارامتر مورد نظر بر پاسخ مورد نظر تاثیر فراوان دارد و اگر مقدار این پارامتر از ۰/۱ بیشتر شود، پارامتر مذکور بر پاسخ تاثیر چندانی ندارد [۲۲].

بنابراین با توجه به جدول ۵، کربن فعال موثرترین پارامتر برای هر ۴ پاسخ است.

جدول ۵- خلاصه جدول ANOVA برای مدل های برازش شده هر پاسخ

پاسخ ها	COD	BOD	$[NO_3^-]$	$[PO_4^{3-}]$
Model	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۱۴	۰/۰۱۷۶	۰/۰۰۸۲
A-Activated Carbon	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۶۹	۰/۰۰۰۸
B-Sludge	۰/۳۵۵۰	۰/۳۹۲۸	۰/۰۴۹۰	۰/۰۱۲۵
C-Algae	۰/۳۵۵۰	۰/۲۹۰۹	۰/۰۵۹۱	۰/۰۴۱۲
AB	۰/۵۶۹۱	۰/۶۴۵۴	۰/۰۶۵۸	۰/۸۰۱۵

۰/۲۲۷۷	۰/۰۲۶۷	۰/۷۵۸۲	۰/۵۶۹۱	AC
۰/۸۰۱۵	۰/۰۱۱۲	۰/۲۳۶۱	۰/۲۰۱۲	BC
۰/۷۵۲۶	۰/۸۶۴۴	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۴	A²
۰/۲۵۵۰	۰/۹۸۶۴	۰/۳۰۴۸	۰/۳۱۹۶	B²
۰/۰۱۵۰	۰/۴۹۹۹	۰/۸۹۱۶	۰/۹۷۱۶	C²

شایان ذکر است هرچقدر مقادیر R به ۱ نزدیک تر باشد بیانگر مطابقت بالای نتایج حاصل از مدل با نتایج واقعی یا آزمایشگاهی است [۱۷].

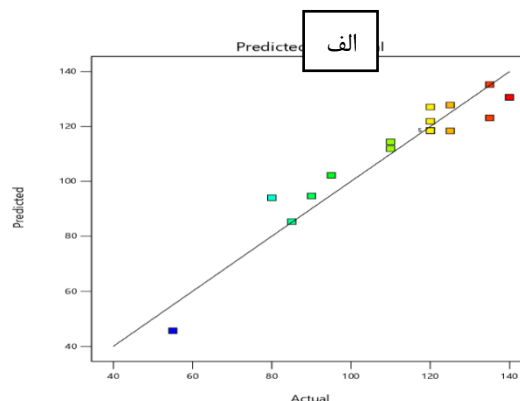
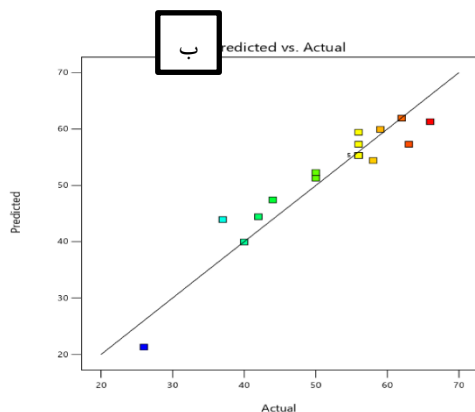
معادلات نهایی مدل برای پیش بینی رفتار پاسخها به همراه مقادیر R² آن ها، در جدول ۶ ارائه شده است.

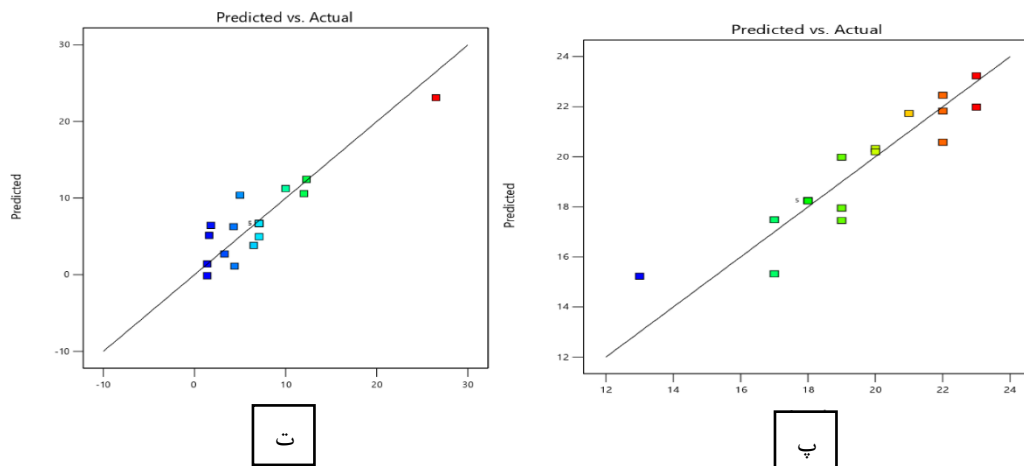
جدول ۶- معادلات نهایی آنالیز سطح جواب بر حسب عامل های واقعی

پاسخ	معادلات نهایی آنالیز سطح جواب	R-Squared
COD	$+94.92399 + 19.85923 * \text{Activated Carbon} - 0.679054 * \text{Sludge} + 1.98761 * \text{Algae} + 0.166667 * \text{Activated Carbon} * \text{Sludge} - 0.0166667 * \text{Activated Carbon} * \text{Algae} - 0.077778 * \text{Sludge} * \text{Algae} - 4.41441 * \text{Activated Carbon}^2 + 0.034535 * \text{Sludge}^2 + 0.001201 * \text{Algae}^2$	۰/۹۱۳۸
BOD	$45.25901 + 9.28829 * \text{Activated Carbon} - 0.363964 * \text{Sludge} + 0.0891592 * \text{Algae} + 0.066667 * \text{Activated Carbon} * \text{Sludge} - 0.044444 * \text{Activated Carbon} * \text{Algae} - 0.035556 * \text{Sludge} * \text{Algae} - 2.11261 * \text{Activated Carbon}^2 + 0.017718 * \text{Sludge}^2 - 0.002282 * \text{Algae}^2$	۰/۹۰۲۴
[NO₃⁻]	$-14.24931 - 2.64861 * \text{Activated Carbon} + 2.62472 * \text{Sludge} - 0.101389 * \text{Algae} - 0.227778 * \text{Activated Carbon} * \text{Sludge} + 0.287778 * \text{Activated Carbon} * \text{Algae} - 0.069111 * \text{Sludge} * \text{Algae} - 0.055556 * \text{Activated Carbon}^2 - 0.000222 * \text{Sludge}^2 + 0.008889 * \text{Algae}^2$	۰/۸۱۸۳
[PO₄²⁻]	$+34.81926 + 0/091216 * \text{Activated Carbon} - 0.425751 * \text{Sludge} - 0.636862 * \text{Algae} - 0.011111 * \text{Activated Carbon} * \text{Sludge} - 0.055556 * \text{Activated Carbon} * \text{Algae} + * \text{Sludge}^2 + ۰.۰۶۰۶۶۰.002222 * \text{Sludge} * \text{Algae} + 0/040541 * \text{Activated Carbon}^2 + 0.0 * \text{Algae}^2 - ۰.۱۴۹۵۵۰.$	۰/۸۵۰۳

نمودارهای مقایسه مقادیر پیش بینی شده و تجربی

شکل ۴ مقایسه مقادیر پیش بینی شده و مقادیر تجربی را نشان می دهد. تطابق نسبی مقادیر پیش بینی شده و مقادیر تجربی، نشان دهنده قابل قبول بودن آزمایشات، طراحی آزمایش و معادلات پیش بینی پاسخها در شرایط مختلف است. به طوری که در نمودار شکل ۴، نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی بسیار به هم نزدیک بوده و در مقایسه با خط ۴۵ درجه (x=y) انحراف کمی دارد.





شکل ۴: نمودار مقایسه مقادیر پیش بینی شده و تجربی پاسخ‌ها - الف: COD، ب: BOD، پ: نیترات، ت: فسفات

نتیجه گیری

در جدول ۴ آزمایش های طراحی شده و پاسخ آن‌ها ارائه شده است. کمترین مقدار COD برابر ۵۵ میلی گرم بر لیتر بوده است (آزمایش ۱۹) که برای رسیدن به این مقدار مطلوب درصد حجمی جلبک و لجن فعال برابر ۲۲/۵ درصد و غلظت کربن فعال برابر ۶/۵ گرم بر لیتر بوده است. لازم به ذکر است که کمترین مقدار BOD (۲۶mg/L) و فسفات (۱۳mg/L) هم در آزمایش ۱۹ با همین مقادیر عوامل متغیر مستقل بدست آمده است. اما کمترین مقدار نیترات (۱/۴mg/L) در آزمایش ۶، جایی که غلظت کربن فعال برابر ۵ میلی گرم در لیتر و درصد حجمی لجن فعال و جلبک برابر ۱۵ درصد بوده، بدست آمده است.

منابع و مراجع

- [1] Yang, Z. and S. Zhou, The biological treatment of landfill leachate using a simultaneous aerobic and anaerobic (SAA) bio-reactor system. *Chemosphere*, 2008. 72(11): p. 1751-1756.
- [2] Lina, W., et al., Nitrogen removal via nitrite from municipal landfill leachate. *Journal of Environmental Sciences*, 2009. 21(11): p. 1480-1485.
- [3] B. Clément, R.C. Janssen, A. Le D`u-Delepiere, Estimation of the hazard of landfills through toxicity testing of leachates, *Chemosphere* 35 (1997) 2783–2796.
- [4] A. Lopez, M. Pagano, A. Volpe, A. Di Pinto, Fenton's pre-treatment of mature landfill leachate, *Chemosphere* 54(2004) 1005–1010.
- [5] J.J. Wu, C. Wu, H. Ma, C.C. Chang, Treatment of landfill leachate by ozone-based advanced oxidation processes, *Chemosphere* 54 (2004)997–1003
- [6] A.C. Silva, M. Dezotti, G.L. Sant'Anna Jr., Treatment and detoxication of a sanitary landfill leachate, *Chemosphere* 55 (2004) 207–214.
- [7] S.K. Marttinen, R.H. Kettunen, K.M. Sormunen, R.M. Soimasuo, J.A. Rintala, Screening of physical–chemical methods for removal of organic material, nitrogen and toxicity from low strength landfill leachates, *Chemosphere* 46 (2002) 851–858.
- [8] H.A. Aziz, M.S. Yussff, M.N. Adlan, N.H. Adnan, S. Alias, Physicochemical removal of iron from semi-aerobic leachate by limestone filter, *Waste Manage.* 24 (2004) 353–358.
- [9] Cheng, S.Y., et al., Landfill leachate wastewater treatment to facilitate resource recovery by a coagulation-flocculation process via hydrogen bond. *Chemosphere*, 2021. 262: p. 127829.
- [10] Renou, S., et al., Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of hazardous materials*, 2008. 150(3): p. 468-493.
- [11] Shadi, A.M.H., Kamaruddin, M.A., Niza, N.M., Emmanuel, M.I., Hossain, M.S., Ismail, N., 2020. Electro flotation treatment of stabilized landfill leachate using titanium-based electrode. *Int .J. Environ. Sci. Technol.*
- [12] Silva, T.F.C.V., Soares, P.A., Manenti, D.R., Fonseca, A., Saraiva, I., Boaventura, R.A.R., Vilar, V.J.P., 2017. An innovative multistage treatment system for sanitary landfill leachate depuration: Studies at pilot-scale. *Sci. Total Environ.*
- [13] Torretta, V., Ferronato, N., Katsoyiannis, I., Tolkou, A., Airolidi, M., 2017. Novel and conventional technologies for landfill leachates treatment: A review. *Sustainability* 9, 9.
- [14] Miao, L., Yang, G., Tao, T., Peng, Y., 2019. Recent advances in nitrogen removal from landfill leachate using biological treatments - A review. *J. Environ. Manag.* 235 ,
- [15] Aftab, B., Ok, Y.S., Cho, J., Hur, J., 2019. Targeted removal of organic foulants in landfill leachate in forward osmosis system integrated with biochar/activated carbon treatment. *Waterres.* 160, 217-227.
- [16] Pastore, C., Barca, E., Del Moro, G., Di Iaconi, C., Loos, M., Singer, H.P., Mascolo, G., 2018. Comparison of different types of landfill leachate treatments by employment of nontarget screening to identify residual refractory organics and principal component analysis. *Sci. Total Environ.* 635, 984-994
- [17] Aziz SQ, Aziz HA, Yusoff MS. Landfill leachate treatment using pac supplemented SBR techniqu influence of input air. *Wnd International Conference on Environmental and Agriculture Engineering.* 2012;37:9-14.
- [18] Ying We, Bonk RR, Sojka SA. Treatment of a landfill leachate in powdered activated carbon enhanced sequencing batch bioreactors. *Environmental Progress and Sustainable Energy.* 1987;6(1):1-8.
- [19] Aziz SQ, Aziz HA, Yusoff MS, Bashir MJK. Landfill leachate treatment using powdered activated carbon augmented sequencing batch reactor (SBR) process: Optimization by response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials.* 2011;189(1):404-13.
- [20] Peyravi, M., Jahanshahi, M., Alimoradi, M., Ganjian, E., 2016. Old landfill leachate treatment through multistage process: membrane adsorption bioreactor and nanofiltration. *Bioprocess Biosyst. Eng.* 39, 1803–1816. <https://doi.org/10.1007/s00449-016-1655-0>
- [21] Shunni Zhu, Lei Qin. Pingzhong Feng, Changhua Shang, Zhongming Wang, Zhenhong Yuan. Treatment of low C/N ratio wastewater and biomass production using co-culture of *Chlorella vulgaris* and activated sludge in a batch photobioreactor
- [22] APHA (American Public Health Association), (1998). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 20th Ed. APHA, AWWA, WEF.