دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

**پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- محیط زیست**

# موضوع:

# تجزیه بیولوژیکی ترکیبات فنلی تحت شرایط بی هوازی با استفاده از راکتور با بستر شناور


استاد راهنما:

**آقای دکتر قاسم نجف پور**

استاد مشاور:

**آقای دکتر بهرام نوائی نیا**

تدوین و نگارش:

**رویا پیشگر**


**شهریور ۱۳۹۰**

به نام خداوند جان و خرد

سپاس بسیار از جناب آقای پروفسور نجف پور که با زحمات و محبت های پدرانه و بی دریغ شان در این راه مرا یاری و راهنمایی نمودند. همچنین از جناب آقای دکتر نوائی نیا به دلیل کمک ها و مشاوره های ارزشمندشان، از جناب آقای دکتر مهدوی و جناب آقای دکتر قریشی به دلیل صرف وقت به منظور مطالعه و بررسی پایان نامه و نیز جناب آقای دکتر توکلی مدیریت محترم گروه عمران قدردانی می نمایم.

از خانواده ام که با همیاری های بزرگوارنه و صبورانه شان مرا همراهی نمودند و از تمام دوستانم به دلیل تمام کمک ها و دلگرمی های شان بسیار سپاسگزارم.

تقدیم به پدرم، مادرم و خواهرانم

**چکیده**

تجزیه بیولوژیکی فنل در محیط ناپیوسته و پیوسته مورد مطالعه قرار گرفت. در محیط های کشت، از جمعیت میکروبی مختلط کشت شده از مخلوط پساب و لجن تصفیه خانه کارخانه چوب و کاغذ ساری و نیز پساب کارخانه ذوب آهن استفاده شد. جمعیت میکروبی مختلط در محیط بی هوازی، دمای اتاق (حدود ۲۵°C) و pH اولیه ۷ کشت شده بود. اثر غلظت اولیه فنل بر تجزیه بیولوژیکی آن در محیط ناپیوسته مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایشات از میکروارگانیسم‌های معلق و تثبیت شده استفاده گردید. آزمایشات ناپیوسته با میکروارگانیسم‌های معلق در ارلن‌های ۲۵۰ میلی‌لیتر و با میکروراگانیسم‌های تثبیت شده در بطری‌های سرم صورت گرفت. در این آزمایشات غلظت فنل بین ۲۵ تا ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر متغیر بود. مدت زمان این آزمایشات بین ۱۵ تا ۳۰ روز در نظر گرفته شد. در ابتدا میکروارگانیسم‌ها توانایی حذف ۴۰۰ میلی گرم در لیتر فنل را در مدت ۲۶ روز داشتند. در حضور ۱۸۰۰ میلی گرم در لیتر گلوکز به عنوان منبع کربنی مکمل، توانایی میکروارگانیسم‌ها در حذف فنل افزایش یافت به طوریکه توان حذف فنل ۶۰۰ میلی گرم در لیتر را در مدت ۳۰ روز با بازده حذف بیش از ۹۸٪ به دست آوردند. پس از طی یک دوره خودهی طولانی مدت، میکروارگانیسم‌ها توانستند غلظت ۷۰۰ میلی گرم در لیتر فنل را در مدت ۱۲ روز حذف نموده و بر نرخ تجزیه فنل نیز افزوده شد. با تثبیت میکروارگانیسم‌های خو یافته، سرعت تجزیه فنل افزایش پیدا کرد و به مقدار ۲/۶۵ میلی گرم در لیتر به ازای هر ساعت در ۷۰۰ میلی گرم در لیتر فنل رسید. تحت این شرایط بازدهی حذف فنل ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر به حدود ۴۰٪ افزایش یافت. مدل هیلدن با ضریب همبستگی بیش از ۰/۹ سینتیک رشد میکروبی را مدل نمود. ضریب بازده سنتز سلولی ۰/۱۶ میلی گرم بیومس به ازای میلی گرم در لیتر غلظت فنل مصرف شده به دست آمد.

دوره راندازی در ۵ مرحله به مدت ۶۵ روز به طول انجامید. در این دوره غلظت فنل اولیه فنل برابر با ۱۰۰ بود که به ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر افزایش یافت. افزایش غلظت فنل زمانی انجام می‌شد که بازده بیش از ۹۶٪ در حذف آن در حالت پایدار مشاهده می‌گردید. در پایان این دوره، بیوراکتور به راندمان ۸۴ و ۷۹٪ به ترتیب در حذف فنل و COD در غلظت ورودی ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر فنل رسید. در مقایسه با سیستم ناپیوسته، بازده حذف فنل با غلظت حدود mg/l ۱۰۰۰ در سیستم پیوسته به میزان قابل توجهی افزایش یافت. بیشینه نرخ حجمی تولید بیوگاز حدود l/l.d ۴/۵۵ در پایان دوره راه اندازی اندازه گیری شد. با کاهش HRT از ۳ روز به ۰/۱۵ روز سیستم عملکرد خوبی از خود نشان داد. در این دوره راندمان حذف فنل ۹۸-۹۳٪ به دست آمد. در زمان ماند هیدرولیکی ۰/۱ روز (۲/۴ ساعت) عملکرد سیستم دچار ناپایداری و شکست شد.

**کلیدواژه‌ها: بی‌هوازی، تصفیه بیولوژیکی، تجزیه بیولوژیکی، نرخ بارگذاری آلی** (OLR)**، فنل،** AFBR.

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


**فصل اول: کلیات** ۱

**۱-۱ مقدمه** ۲

**۱-۲ تعریف موضوع** ۳

**۱-۳ هدف پژوهش** ۵

**۱-۴ ضرورت پژوهش** ۵

**۱-۵ فرضیات پژوهش** ۶

**۱-۶ دامنه پژوهش** ۷

**۱-۷ مکان، زمان و شرایط انجام کار** ۷

**فصل دوم: ادبیات موضوع تحقیق و پیشینه پژوهش** ۹

**۲-۱ هیدروکربن‌ها** ۱۰

۲-۱-۱ هیدروکربن‌های آروماتیک ۱۰

۲-۱-۲ آروماتیک‌ها در محیط زیست ۱۱

**۲-۲ فنل** ۱۲

۲-۲-۱ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی فنل ۱۳

۲-۲-۲ مصارف فنل و سنتز صنعتی آن ۱۴

۲-۲-۳ فنل در محیط زیست ۱۵

۲-۲-۳-۱ منابع طبیعی ۱۵

۲-۲-۳-۲ منابع انسانی ۱۵

۲-۲-۳-۳ واکنش‌های درون زای زیست محیطی ۱۵

۲-۲-۴ اثرات فنل بر سلامتی ۱۶

**۲-۳ تصفیه فاضلاب فنلی** ۱۷

| عنوان | صفحه |
|---|---|


| | |
|---|---|
| ۲-۳-۱ تصفیه فیزیکی و شیمیایی | ۱۷ |
| ۲-۳-۲ تصفیه بیولوژیکی | ۱۸ |
| **۲-۴ میکروارگانیسم مناسب در تصفیه بیولوژیکی ترکیبات فنلی** | ۱۹ |
| **۲-۵ شرایط محیطی موثر بر تجزیه بیولوژیکی فنل** | ۲۲ |
| ۲-۵-۱ دسترسی به سوبسترا | ۲۳ |
| ۲-۵-۲ حضور پذیرنده الکترون مناسب | ۲۳ |
| ۲-۵-۳ مواد مغذی کافی | ۲۳ |
| ۲-۵-۴ دمای محیط | ۲۴ |
| ۲-۵-۵ pH محیط | ۲۶ |
| **۲-۶ اثر بازدارندگی فنل بر فعالیت توده بیولوژیکی** | ۲۷ |
| **۲-۷ چگونگی غلبه بر اثر بازدارندگی فنل** | ۲۸ |
| **۲-۸ دسته بندی فرآیندهای بیولوژیکی براساس رشد میکروبی** | ۲۹ |
| ۲-۸-۱ رشد معلق | ۲۹ |
| ۲-۸-۲ رشد چسبیده | ۳۰ |
| **۲-۹ دسته بندی فرآیندهای بیولوژیکی براساس محیط بیوشیمیایی** | ۳۰ |
| ۲-۹-۱ فرآیندهای بیولوژیکی هوازی | ۳۰ |
| ۲-۹-۲ فرآیندهای بیولوژیکی بی‌هوازی | ۳۱ |
| ۲-۹-۲-۱ پیشینه تصفیه بی هوازی | ۳۱ |
| ۲-۹-۲-۲ نحوه دگرگونی مواد آلی در سیستم بی‌هوازی | ۳۲ |
| ۲-۹-۲-۳ مقایسه تصفیه هوازی و بی‌هوازی | ۳۴ |
| **۲-۱۰ مطالعات انجام شده در تصفیه بیولوژیکی فاضلاب فنلی** | ۳۶ |
| ۲-۱۰-۱ تصفیه هوازی ترکیبات فنلی | ۳۶ |
| ۲-۱۰-۲ تصفیه بی‌هوازی ترکیبات فنلی | ۴۱ |

**عنوان** **صفحه**


**۲-۱۲ بیوراکتور بستر شناور** ۵۰

۲-۱۲-۱ مزایای بیوراکتور بستر شناور بی‌هوازی ۵۲

۲-۱۲-۲ معایب بیوراکتور بستر شناور بی‌هوازی ۵۲

۲-۱۲-۳ کارایی بیوراکتور با بستر شناور در تصفیه فاضلاب‌های مختلف ۵۳

۲-۱۲-۴ انواع واسطه و سرعت رو به بالا در بیوراکتور با بستر شناور ۵۶

**فصل سوم: روش اجرا و تجهیزات پژوهش** ۵۸

**۳-۱ تهیه میکروارگانیسم** ۵۹

**۳-۲ تهیه محیط کشت مایع** ۵۹

**۳-۳ غلبه بر اثر بازدارندگی فنول بر ارگانیسم ها** ۶۱

۳-۳-۱ افزودن منبع کربنی مکمل ۶۲

۳-۳-۲ پیش- خودهی میکروارگانیسم ها ۶۲

۳-۳-۳ تثبیت میکروارگانیسم ها ۶۲

**۳-۴ سیستم ناپیوسته** ۶۴

**۳-۵ طراحی و ساخت بیوراکتور** ۶۵

**۳-۶ اندازه گیری بیوگاز تولیدی** ۶۸

**۳-۷ آنالیز نمونه ها** ۶۹

۳-۷-۱ روش رنگ سنجی مستقیم جهت اندازه گیری غلظت فنل ۶۹

۳-۷-۲ اکسیژن موردنیاز شیمیایی (COD) ۷۱

۳-۷-۳ اندازه گیری میزان وزن خشک سلولی (CDW) ۷۳

**عنوان** **صفحه**


۴-۷-۳ اندازه گیری قلیائیت و اسید های چرب فرار ۷۳

**۳-۸ دستگاههای مورد استفاده** ۷۶

**فصل چهارم: داده‌های آزمایشگاهی** ۷۸

**۴-۱ نمودارهای استاندارد** ۷۹

۴-۱-۱ نمودار استاندارد غلظت فنل ۷۹

۴-۱-۲ نمودار استاندارد غلظت COD ۷۹

۴-۱-۳ نمودار استاندارد وزن خشک سلولی ۸۰

۴-۱-۴ نمودار استاندارد COD معادل فنل ۸۱

**۴-۲ حذف فنل در سیستم ناپیوسته** ۸۲

۴-۲-۱ بررسی توانایی اولیه میکروارگانیسم ها در حذف فنل ۸۲

۴-۲-۲ بررسی حذف فنل در حضور گلوکز ۸۴

۴-۲-۳ بررسی حذف فنل توسط ارگانیسم‌های خو یافته ۸۷

۴-۲-۴ بررسی حذف فنل توسط ارگانیسم‌های تثبیت شده ۹۰

۴-۲-۵ بررسی نرخ تجزیه بیولوژیکی فنل در آزمایشات ناپیوسته ۹۲

**۴-۳ بررسی سینتیک رشد میکروارگانیسم ها** ۹۳

۴-۳-۱ محاسبه مقادیر نرخ رشد ویژه ۹۳

۴-۳-۲ بررسی مدل های سینتیکی ۹۵

۴-۳-۳ محاسبه ضریب بازده سنتز سلولی ۹۹

**۴-۴ حذف فنل در سیستم پیوسته** ۱۰۰

۴-۴-۱ راه اندازی بیوراکتور بستر شناور بی‌هوازی (AFBR) ۱۰۰

**عنوان** **صفحه**


۴-۴-۱-۱ غلظت فنل و COD ورودی و نرخ بارگذاری آنها ۱۰۰

۴-۴-۱-۲ تغییرات غلظت فنل و COD و بازده حذف آنها ۱۰۱

۴-۴-۱-۳ اسیدهای چرب فرار، قلیائیت و pH ۱۰۴

۴-۴-۱-۴ تولید بیوگاز ۱۰۵

۴-۴-۲ بررسی اثر زمان ماند هیدرولیکی بر عملکرد سیستم AFBR ۱۰۶

۴-۴-۲-۱ تغییرات HRT و میزان بارگذاری فنل و COD در فاضلاب ورودی ۱۰۶

۴-۴-۲-۲ غلظت فنل و COD در پساب خروجی و بازده حذف آنها ۱۰۷

۴-۴-۲-۳ اسیدهای چرب فرار، قلیائیت و pH ۱۱۰

۴-۴-۲-۴ تولید بیوگاز ۱۱۲

**فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات** ۱۱۳

**۵-۱ نتیجه گیری** ۱۱۴

**۵-۲ پیشنهادات** ۱۱۶

**منابع** ۱۱۸

# فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**


شکل ۲-۱: نمونه‌هایی از ترکیبات آروماتیکی یک و چند حلقه ۱۱

شکل ۲-۲: تجزیه بیولوژیکی مواد آلی تحت شرایط بی هوازی ۳۳

شکل۲-۴: بیوراکتور بستر شناور به صورت شماتیک و در مقیاس بزرگ ۵۱

شکل ۳-۱: محیط کشت بکار رفته در این پژوهش ۶۱

شکل ۳-۲: دانه‌های تثبیت شده و محیط کشت مورد استفاده برای عمل تثبیت ۶۴

شکل ۳-۳: آزمایشات ناپیوسته با میکروارگانیسم‌های معلق (a) و تثبیت شده (b) ۶۵

شکل ۳-۴: شکل شماتیک بیوراکتور بستر شناور بی هوازی ۶۶

شکل ۳-۵: نمای بیوراکتور بستر شناور بی هوازی ساخته شده در آزمایشگاه ۶۷

شکل ۳-۶: دانه‌های تثبیت شده مورد استفاده در بیوراکتور به عنوان بستر ۶۸

شکل ۳-۷: تغییر رنگ نمونه ها در روش رنگ سنجی جهت اندازه گیری غلظت فنل ۷۰

شکل ۴-۱: نمودار استاندارد غلظت فنل ۷۹

شکل ۴-۲: نمودار استاندارد غلظت COD ۸۰

شکل ۴-۳: نمودار استاندارد وزن خشک سلولی ۸۱

شکل ۴-۴: نمودار استاندارد COD معادل فنل ۸۱

غلظت ۴-۵: روند تغییرات غلظت فنل در غلظت‌های کم (a) و زیاد (b) در بررسی توانایی اولیه ارگانیسم‌ها در حذف آن ۸۳

شکل ۴-۶: بازده حذف فنل با غلظت های ۱۰۰۰-۲۵ میلی گرم بر لیتر در مدت ۳۰ روز ۸۳

شکل ۴-۷: تغییرات رشد میکروبی در مدت زمان ۳۰ روز ۸۴

شکل ۴-۸: روند تغییرات غلظت فنل برای مقادیر اولیه کم (a) و زیاد (b) در حضور گلوکز ۸۵

شکل ۴-۹: بازده حذف فنل با غلظت های ۱۰۰۰-۲۵ میلی گرم بر لیتر در مدت ۳۰ روز در حضور گلوکز ۸۶

شکل ۴-۱۰: تغییرات رشد میکروبی در مدت زمان ۳۰ روز در اثر تجزیه و مصرف همزمان فنل و گلوکز ۸۶

شکل ۴-۱۱: تغییرات غلظت فنل نسبت به زمان در نتیجه تجزیه آن توسط ارگانیسم های خو یافته ۸۸

شکل ۴-۱۲: بازده حذف فنل توسط ارگانیسم های خو یافته ۸۹

# فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**


شکل ۴-۱۳: نمودار رشد میکروارگانیسم های خو یافته در غلظت های مختلف فنل ۸۹

شکل ۴-۱۴: تغییرات غلظت فنل نسبت به زمان در نتیجه تجزیه آن توسط ارگانیسم‌های خو یافته و تثبیت شده ۹۱

شکل ۴-۱۵: بازده حذف فنل توسط ارگانیسم های تثبیت شده و خو یافته ۹۱

شکل ۴-۱۶: نرخ تجزیه فنل بیولوژیکی فنل در آزمایشات ناپیوسته ۹۲

شکل ۴-۱۷: تغییرات لگاریتمی رشد میکروارگانیسم ها بدون خو دهی در حذف فنل نسبت به زمان ۹۴

شکل ۴-۱۸: تغییرات لگاریتمی رشد میکروارگانیسم های خو یافته به فنل نسبت زمان ۹۴

شکل ۴-۱۹: مدل سینتیکی هیلدن برای رشد ارگانیسم‌های خو یافته و خو نیافته به فنل ۹۶

شکل ۴-۲۰: محاسبه ضریب بازده سنتز سلولی برای ارگانیسم‌های خویافته به فنل ۹۹

شکل ۴-۲۱: غلظت فنل و COD در فاضلاب ورودی و نرخ بارگذاری آنها در دوره راه اندازی بیوراکتور ۱۰۰

شکل ۴-۲۲: تغییرات غلظت فنل در پساب خروجی در دوره راه اندازی بیوراکتور ۱۰۱

شکل ۴-۲۳: تغییرات غلظت COD در پساب خروجی در دوره راه اندازی بیوراکتور ۱۰۲

شکل ۴-۲۴: راندمان حذف فنول و COD در دوره راه اندازی بیوراکتور ۱۰۳

شکل ۴-۲۵: تغییرات اسیدهای چرب فرار (VFAs)، قلیائیت و pH در بیوراکتور در دوره راه اندازی ۱۰۴

شکل ۴-۲۶: نرخ حجمی تولید بیوگاز در دوره راه اندازی ۱۰۵

شکل ۴-۲۷: غلظت فنل و COD در فاضلاب ورودی و نرخ بارگذاری آنها در بررسی HRT ۱۰۷

شکل ۴-۲۸: اثر تغییرات زمان ماند هیدرولیکی بر غلظت فنل و COD ۱۰۸

شکل ۴-۲۹: اثر تغییرات زمان ماند هیدرولیکی بر بازده حذف فنل و COD ۱۰۹

شکل ۴-۳۰: تغییرات VFAs، قلیائیت و pH در دوره بررسی اثر زمان ماند هیدرولیکی ۱۱۱

شکل ۴-۳۱: نرخ حجمی تولید بیوگاز در اثر کاهش زمان ماند هیدرولیکی ۱۱۲

# فهرست جداول

**عنوان** **صفحه**


جدول ۲-۱: هیدروکربن‌ها، ویژگی ها و نمونه هایی از آنها ۱۰

جدول ۲-۲: ترکیبات فنلی، ویژگی ها و نمونه هایی از آنها ۱۲

جدول ۲-۳: خواص فیزیکی و شیمیایی فنل ۱۳

جدول۲-۴: نمونه هایی از میکروارگانیسم‌های تجزیه کننده ترکیبات فنلی ۲۰

جدول ۲-۵: تجزیه بیولوژیکی ترکیبات فنلی توسط جمعیت میکروبی مختلط ۲۱

جدول ۲-۶: دسته بندی میکروارگانیسم های پروکاریوتیک در دماهای مختلف ۲۴

جدول ۲-۷: شرایط بهینه برای تجزیه بیولوژیکی فنل به روش هوازی توسط میکروارگانیسم‌های مختلف ۲۵

جدول۲-۸: نمونه هایی از روش‌های تصفیه هوازی و بی‌هوازی در تصفیه بیولوژیکی ۲۹

جدول ۲-۹: فرآیندهای بیولوژیکی هوازی در تصفیه فاضلاب فنلی ۳۷

جدول ۲-۱۰: فرآیندهای بیولوژیکی بی‌هوازی در تصفیه فاضلاب فنلی ۴۲

جدول ۲-۱۱: تصفیه فاضلاب‌های مختلف توسط بیوراکتور بستر شناور ۵۳

جدول ۲-۱۲: نوع واسطه و سرعت صعودی جریان گزارش شده برای بیوراکتور بستر شناور ۵۶

جدول ۳-۱: مواد مغذی موجود در محیط کشت مایع ۶۰

جدول ۴-۱: پارامترهای سینتیکی مدل‌های مختلف به کار رفته در این پژوهش ۹۶

جدول ۴-۲: مقایسه پارامترهای سینتیکی هیلدن با نتایج بدست آمده در پژوهش‌های مختلف ۹۸

# علائم و تعاریف

| | |
|---|---|
| AFBR | **بیوراکتور بستر آکنده بی هوازی با جریان رو به بالا** |
| COD | کل اکسیژن موردنیاز شیمیایی فاضلاب (mg/l) |
| HRT | زمان ماند هیدرولیکی (ساعت یا روز) |
| VFAs | اسیدهای چرب فرار (mg/l as acetic acid) |
| OLR | نرخ بار آلی ورودی (g COD/l.d) |
| TA | قلیایت کل (mg/l as $CaCO_3$) |
| $\mu$ | نرخ رشد ویژه ($h^{-1}$) |
| $\mu_m$ | نرخ رشد ویژه ماکزیمم ($h^{-1}$) |
| $X$ | بیومس تولید شده (mg/l) |
| $S$ | غلظت سوبسترا (mg/l) |
| $S_0$ | غلظت سوبسترای اولیه (mg/l) |
| $K_s$ | ثابت نیمه اشباع سوبسترا (mg/l) |
| $K_i$ | ثابت بازدارندگی سوبسترا (mg/l) |

فصل اول

# کلیات

## ۱-۱ مقدمه

در صده‌های اخیر، پیشرفت صنعت و کشاورزی باعث ارتقا سطح کیفی زندگی بشر شده است. از طرف دیگر، گسترش فعالیت‌های صنعتی منجر به تولید حجم گسترده‌ای از آلاینده‌ها گردیده است. این آلاینده‌ها بیوسفر و محیط زیست را به مخاطره انداخته و آینده‌ی زمین را به طور نامعلومی تیره می‌نماید. بنابراین کاهش سطح آلاینده‌ها در فاضلاب‌های شهری، کشاورزی و صنعتی پیش از تخلیه آنها به بدنه‌ی آبهای پذیرنده یکی از راه‌های حفاظت از محیط زیست است [۱-۲].

ترکیبات فنلی یا «فنل‌ها» از جمله ترکیبات آلی هستند که عمدتاً از کربن و هیدروژن ساخته شده‌اند. این ترکیبات در دسته هیدروکربن‌های اکسیژنه قرار می‌گیرند [۳-۴] و از آلاینده‌های مهم محیط زیست به شمار می‌روند. فنل ساده‌ترین عضو از این خانواده بوده و از آلاینده‌های متداول آب است. این ماده در هنگام فرآیندهای اکسیداسیون و گندزدایی آب باعث تشکیل ترکیبات جانشین مانند فنل‌های پلی‌کلرینه می‌شود. این ترکیبات سمی حتی در غلظت های کم (۰/۲ میکروگرم در لیتر) باعث ایجاد طعم و بو در آب می شوند. فنل به صورت طبیعی و در اثر فعالیت‌های بشری در طبیعت انتشار می‌یابد [۵-۷]. پساب‌های صنایع مختلف باعث انتشار گسترده فنل در محیط زیست هستند. این صنایع عبارتند از: تولید کک، تبدیل زغال سنگ، ساخت رزین، پالایش نفت و پتروشیمی، فولاد، داروسازی، رنگ و نساجی، مواد منفجره، آفت‌کش‌ها و کاغذسازی [۸-۱۱]. فنل یک ترکیب شیمیایی مهم در صنعت بوده و در تولید رزین به عنوان ماده اولیه استفاده می‌گردد [۱۲]. مقدار فنل در پساب‌های صنعتی بین ۱۷۵۰۰- ۱۰ میلی گرم در لیتر گزارش شده است [۱۰].

فنل ماده‌ای سمی است و وجود آن در محیط زیست بر سلامت انسانها، گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌ها اثر سو داشته و به آب بو، طعم و مزه نامطلوبی می دهد. با در نظر گرفتن اثرات سمی فنل، این ترکیب توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده[1] و کمیته اقتصادی اروپا[2] به عنوان یکی از

[1] U. S. Environmental protection agency (USEPA)
[2] European economic community (EEC)

آلاینده‌های اولیه دسته‌بندی شده است [۱۳-۱۵]. بنابراین دفع و حذف ترکیبات فنلی از محیط زیست از نگرانی‌های جهانی بوده و پخش این ماده آلی در طبیعت به گستردگی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۱-۲ تعریف موضوع

تجزیه بیولوژیکی مواد شیمیایی یک راه حذف آنها از محیط زیست است. تجزیه بیولوژیکی با حضور میکروارگانیسم‌ها به ویژه باکتری‌ها انجام می‌شود. میکروارگانیسم‌ها با انجام واکنش‌های اکسایش و کاهش به روی مواد شیمیایی غذای مورد نیاز برای حیات‌شان را تامین می‌کنند. این واکنش‌ها انرژی و قدرت کاهندگی لازم برای سوخت و ساز و بقای میکروارگانیسم‌ها را تامین نموده و از طرف دیگر در جریان این واکنش‌ها مواد شیمیایی که معمولا آلاینده‌ها هستند مصرف می‌شوند [۳]. تصفیه بیولوژیکی نقش مهمی را در مدیریت فاضلاب ایفا می‌کند. فرایندهای بیولوژیکی قادر به حذف آلاینده‌های آلی به صورت موثر و دوستدار محیط زیست هستند. به علاوه به روش بیولوژیکی می‌توان آلاینده‌های خطرناک و سمی مانند فنل و ترکیبات آلی فرار (VOCs) را نیز حذف نمود [۱۶-۲۴].

تصفیه پساب‌های حاوی فنل به روش‌های متداول فیزیکی و شیمیایی از قبیل جذب سطحی، اکسیداسیون شیمیایی، تبادل یونی و نیز فرآیندهای بیولوژیکی امکان‌پذیر است. از این میان، روش‌های بیولوژیکی حذف آلاینده‌ها متنوع، عملی و قابل اطمینان هستند. این روش‌ها به دلیل هزینه‌های پایین، معدنی نمودن کامل فنل و عدم تولید ترکیبات ثانوی سمی بر روش‌های فیزیکی و شیمیایی ترجیح دارند [۵, ۱۴-۱۵, ۲۵-۲۶].

فرآیندهای بیولوژیکی در تصفیه فاضلاب در دو دسته بزرگ رده‌بندی می‌شوند: فرآیندهای رشد معلق و رشد چسبیده (بیوفیلم). در فرآیند رشد معلق، میکروارگانیسم‌ها با به‌کارگیری روش مناسب اختلاط در مایع آزاد و معلق هستند. در حالی که در فرآیندهای رشد چسبیده، ترتیبی اتخاذ می‌گردد که میکروارگانیسم‌ها به بستری خنثی بچسبند [۲۷]. در فرآیند رشد چسبیده با تشکیل بیوفیلم محیط میکروبی مناسبی متشکل از ارگانیسم‌های مختلف برای رشد و تغییر و تبدیل سوبسترا فراهم می شود [۳]. فرآیندهای بیولوژیکی را می‌توان تحت شرایط هوازی و بی‌هوازی به انجام رساند. در شرایط هوازی، فرآیند

بیولوژیکی در حضور اکسیژن اتفاق می‌افتد. در این واکنش‌ها اکسیژن نقش پذیرنده الکترون را ایفا می‌کند. از طرف دیگر، میکروارگانیسم‌ها می‌توانند مواد آلی قابل تجزیه بیولوژیکی را تحت شرایط بی‌هوازی بدون حضور اکسیژن نیز تجزیه کنند. تصفیه بی‌هوازی به دلیل انرژی موردنیاز اندک، تولید کمتر لجن بیولوژیکی، ماده مغذی اندک، تولید متان که یک منبع انرژی بالقوه به شمار می رود، حجم کاری کوچکتر برای راکتور و بار ورودی حجمی بالاتر بر روش هوازی ترجیح دارد [۱۲, ۲۲-۲۳, ۲۷-۲۹]. از روش‌های بیولوژیکی رشد معلق می‌توان به لجن فعال[1] اشاره کرد و از رشد چسبیده می‌توان از بیوفیلتر[2]، راکتور بیولوژیکی با بستر شناور[3]، راکتور بیولوژیکی با بستر متحرک[4]، راکتور بیولوژیکی با بستر آکنده با جریان رو به بالا[5] نام برد. بیوراکتور بستر شناور یک فرآیند بیولوژیکی با نرخ بالاست. جریان فاضلاب در آن به صورت صعودی است و شناورسازی کامل بستر به کمک بازچرخش پساب رخ می دهد. در بیوراکتور بستر متحرک بستر در داخل محفظه ای سوراخدار در داخل بیوراکتور قرار گرفته و به کمک جریان صعودی حرکت آزادانه بستر تنها به فضای آن محفظه محدود می گردد. بیوراکتور بستر آکنده به طورکامل از بستر پر می گردد و جریان صعودی فاضلاب از فضاهای خالی بین اجزای بستر به وقوع می پیوندد. در این نوع بیوراکتور جریان فاضلاب می تواند رو به پایین نیز باشد؛ ولی در جریان رو به بالا احتمال وقوع اتصال کوتاه کمتر است [۳, ۲۷].

در سالهای اخیر توجه زیادی به راکتور بیولوژیکی با بستر شناور به عنوان یک تکنولوژی موثر در تجزیه آلاینده‌های آلی شده است. این تکنولوژی به دلیل فراهم آوردن غلظت بیشتر بایومس، زمان ماند هیدرولیکی پایین، احتیاجات زیربنایی کوچک، عدم نیاز به اجزای متحرک موثرتر از روش‌های بیولوژیکی رشد معلق است. بر طبق مطالعات انجام شده، بیوراکتور بستر شناور برتری‌هایی از لحاظ هیدرودینامیک و انتقال جرم بر دیگر بایوراکتورهای مورد استفاده در تجزیه فاضلاب مانند تانک اختلاط کامل با رشد معلق و بیوراکتورهای رشد چسبیده دارد [۱۳, ۱۹, ۳۰].

[1] Activated sludge
[2] Biofilter
[3] Fluidized bed bioreactor
[4] Moving bed bioreactor
[5] Upflow packed bed bioreactor

این پژوهش با موضوع «تجزیه بیولوژیکی ترکیبات فنلی تحت شرایط بی‌هوازی در راکتور با بستر شناور» به بررسی تجزیه و حذف بیولوژیکی فنل به عنوان شاخصی از خانواده فنل‌ها در بیوراکتور بستر شناور می‌پردازد. در این پژوهش از میکروارگانیسم های تثبیت شده در دانه های کلسیم آلژینات به عنوان بستر استفاده شد. میکروارگانیسم‌های کشت شده به روشی که در فصل ۳ بخش ۳-۳-۳ گفته شد در دانه‌های کلسیم آلژینات تثبیت شدند. از آنجایی که فرآیند بی‌هوازی به دلایلی که در بالا ذکر شد از مقبولیت بیشتری برخوردار است، این پژوهش تحت شرایط بی‌هوازی هدایت شد.

## ۱-۳ هدف پژوهش

هدف از این پژوهش تصفیه بیولوژیکی فاضلاب‌های حاوی فنل با استفاده از بیوراکتور بستر شناور در شرایط بی‌هوازی است. بازدهی این روش تصفیه در تجزیه فنل مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش یک کنسرتیوم میکروبی برای انجام آزمایشات به کار گرفته شد. از آنجایی که فنل یک سوبسترای بازدارنده برای جمعیت میکروبی است [۳۱]، یک فرآیند طولانی خو دهی طی شد تا میکروارگانیسم‌ها توانایی مصرف و تجزیه فنل به عنوان تنها منبع کربن و انرژی را داشته باشند. پیش از آن، تجزیه بیولوژیکی فنل در حضور یک منبع کربنی ساده‌تر یعنی گلوکز به انجام رسید. آزمایشاتی در محیط ناپیوسته و در مقیاس کوچکتر پیش از شروع آزمایشات بیوراکتور موردنظر تحت شرایط پیوسته به انجام رسید تا به این ترتیب دیدگاهی از محدوده غلظتی از فنل که میکروارگانیسم‌ها در آن قادر به فعالیت هستند به دست آید.

## ۱-۴ ضرورت پژوهش

فرآیندهای صنعتی پتانسیل تولید مولکول‌هایی را دارند که از جهت تاثیرات منفی‌شان بر انسان و اکوسیستم آلاینده آب و هوا محسوب می‌شوند. این تاثیرات منفی شامل سمیت، سرطان‌زایی و جهش ژنی هستند [۷]. فنل که یکی از آلاینده‌های مهم محیط زیست است عمدتاً از طریق پساب‌های صنعتی وارد بدنه آب‌های سطحی می‌شود. همانطوری که پیشتر گفته شد، مقدار فنل در پساب‌های صنعتی بین ۱۰-۱۷۵۰۰

میلی گرم در لیتر گزارش شده است [۱۰]. به دلیل انتشار تصادفی و نفوذ آن در خاک از مکان‌های دفن زباله و نیز پسماندهای خطرناک در آب های زیرزمینی نیز دیده شده است [۳۲].

فنل برای موجودات زنده اعم از انسان، حیوان، گیاه و میکروارگانیسم‌ها مضر و حتی در غلظت‌های اندک مرگبار است [۱۵]. غلظت ۲۵-۵ میلی گرم در لیتر فنل حیات موجودات آبزی را به خطر می‌اندازد [۳۳] و غلظت بیش از ۳۰۰-۲۰۰ میلی گرم در لیتر از این ترکیب برای میکروارگانیسم‌ها سمی بوده و باعث مرگ آنها می‌شود [۳]. فنل بر روی ارگان‌های داخلی بدن انسان مانند کبد، کلیه ها و قلب اثر گذاشته و بخارات آن باعث سوختگی چشم و پوست و مجاری تنفسی می‌گردد. در اثر تماس با پوست و چشم نیز ایجاد سوختگی می‌کند [۷]. سازمان جهانی بهداشت[1] (WHO) حداکثر غلظت فنل در آب‌های آشامیدنی را ۱ میکروگرم در لیتر تعیین کرده است. [۵]. براساس تصمیم حفاظت محیط زیست ایالات متحده (USEPA) غلظت مجاز فنل در آبهای سطحی (رودخانه‌ها و دریاچه‌ها) را ۰/۳ میلی‌گرم در لیتر معین شده است. حد مجاز فنل در هوای محل کار توسط سازمان بهداشت و ایمنی حرفه ای[2] (OHSA) برابر با ppm ۵ تعیین شده است. بنابراین تصفیه پساب‌های حاوی ترکیبات فنلی پیش از تخلیه آنها به محیط زیست حائز اهمیت بالایی است.

## ۱-۵ فرضیات پژوهش

در اینجا فرض بر این است که:

۱. روش‌های بیولوژیکی قابلیت تجزیه فنل و دیگر مشتقات آن را داراست؛
۲. فرآیندهای رشد چسبیده در مقایسه با رشد معلق عملکرد موثرتر و بهتری در تجزیه بیولوژیکی فاضلاب آلوده به فنل‌ها از خود نشان می‌دهند؛
۳. برای دستیابی به تجزیه بیولوژیکی فنل، روش بی‌هوازی منجر به نتیجه بهتری می‌شود؛
۴. کنسرتیوم میکروبی مختلط به کار گرفته شده توانایی حذف فنل را دارد.

[1] World health organization (WHO)
[2] Occupational Safety and Health Administration (OSHA)