



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال هشتم، شماره‌ی ۳۲
پاییز ۱۳۹۶، صفحات ۲۳-۱۵

بررسی مقایسه‌ای توان تجمع زیستی و جذب زیستی باکتری سودوموناس آئروژینوزا در حذف مس از پساب‌های صنعتی

سحر مرادی سولاوله

گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
Email: saharmeradi.29470.sss@gmail.com

سرور صادقی

گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
Email: soroorsadeghi@iauksh.ac.ir

سارا شریفی

گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
Email: sarasharifi@iauksh.ac.ir

چکیده

بکارگیری باکتری سودوموناس آئروژینوزا جهت مقایسه فرآیندهای جذب زیستی و تجمع زیستی مس از پساب صنایع شیمیایی انجام گرفته است. جذب زیستی مس به کمک باکتری غیرفعال شده با استریلیزاسیون بخار و باکتری اصلاح ساختار شده به روش پیش تصفیه شیمیایی، جهت دسترسی به حداکثر ظرفیت جذب مورد بررسی قرار گرفته است. مورفولوژی و گروه‌های عاملی سطح باکتری به کمک FTIR و SEM بررسی شده‌اند. بهترین نتایج از باکتری اصلاح شده در شرایط بهینه $\text{pH}=7$ ، دوز جذب ۰/۱ گرم و غلظت اولیه مس 100 mg/L و پس از ۷۵ دقیقه زمان تماس در دمای 37°C بدست آمد و بیش از ۷۶٪ درصد مس حذف گردید، در حالیکه راندمان تجمع زیستی سلول‌های زنده و غیرفعال در همین شرایط و پس از به ترتیب ۳۰ و ۱۵ دقیقه زمان تماس، ۶۸/۹۳ و ۷۱/۴۸ درصد بوده است. بر اساس تطبیق داده‌های تعادلی با مدل‌های سینتیکی، مدل سینتیک شبه مرتبه دوم به خوبی جذب مس بر روی جاذب زیستی اصلاح شده را توصیف نموده است. شرایط بهینه جذب جهت حذف مس از پساب حقیقی صنایع آبکاری فلزات بکار گرفته شد و ۹۹/۶۸ درصد از یون‌های مس موجود با جاذب اصلاح شده حذف گردید. همچنین بازیافت یون‌های مس جذب شده و بازیابی جاذب زیستی مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه: تجمع زیستی، جذب زیستی، پساب‌های صنعتی، مس، سودوموناس آئروژینوزا.

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل محیط‌زیستی، آلودگی فلزات سنگین سمی می‌باشد. مس عنصری طبیعی است که از طریق پساب‌های بسیاری از صنایع شیمیایی و همچنین کشاورزی موجب آلودگی محیط زیست می‌گردد. مس اغلب در نزدیکی معادن، تأسیسات صنعتی و مکان‌های دفن زباله یافت می‌شود. بسیاری از ترکیبات مس با مواد آلی و معدنی واکنش داده، بنابر این بعد از انتشار نمی‌توانند خیلی پراکنده شوند و حتی به سختی می‌توانند وارد آب‌های زیرزمینی شوند. مس در آب‌های سطحی تا مسافت‌های زیادی جا به جا شده و از آنجا که قابل تجزیه نیست در گیاهان و حیوانات و نهایتاً انسان تجمع می‌یابد [۱-۲].

روش‌های متداول حذف فلزات سنگین از محیط آبی شامل ترسیب شیمیایی، تعویض یون، جذب سطحی، فرآیندهای غشایی، تبخیر و فرآیندهای اکسیداسیون و احیا می‌باشد که روش‌هایی گران قیمت و با هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری بالا می‌باشند. جذب زیستی (biosorption)، جذب فیزیوشیمیایی فلزات سنگین توسط سلول زیستی میکروارگانیسم‌های غیر زنده (باکتری، قارچ، جلبک) و سایر پسماندهای آلی است. فرآیند جذب زیستی در مقایسه با روش‌های متداول مقرون به صرفه بودن، خاصیت جذب انتخابی، قابلیت احیای جاذب زیستی و بازیافت فلزات، بالا بودن سرعت فرآیند و عدم تولید لجن می‌باشد، همچنین با استفاده از روش‌های پیش تصفیه فیزیکی و شیمیایی می‌توان عملکرد جاذب‌های زیستی را بهبود بخشید [۳].

در مقابل جذب زیستی، فرآیند تجمع زیستی فلزات (bioaccumulation) که حذف یون فلزی توسط سلول زنده میکروارگانیسم‌هاست، در حذف انتخابی فلزات بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این روش نگهداری سلول‌ها بصورت زنده در تماس با سمیت فلزات سنگین و استفاده از مواد مغذی (nutrient) جهت حفظ جمعیت سالم از سلول میکروارگانیسم ضروری است، بنابراین روش جذب زیستی کاربرد پذیری بالاتری دارد [۴].

سلول‌های زنده و غیر زنده میکروبی به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد کارایی بالایی در حذف فلزات دارند. همچنین سطح این سلول‌ها غنی از گروه‌های عاملی مانند پلی ساکاریدها و پروتئین‌هاست که تمایل زیادی به جذب فلزات دارند [۵-۶]. در محیط‌های آلوده به فلزات سنگین سلول‌های زنده باکتری‌ها نیز دچار مسمومیت شیمیایی می‌شوند، اما برخی سویه‌های باکتریایی مانند سودوموناس اثرورژینوزا (*Pseudomonas aeruginosa*) در دراز مدت به این فلزات مقاومت پیدا می‌کنند [۷-۹]. مکانیزم‌هایی مانند جذب فلز بر سطح سلول، تغییر ترکیب فلز به شکل با سمیت کم‌تر، کاهش نفوذپذیری غشاء و تولید پلی ساکاریدهای خارج سلولی از عمده دلایل مقاومت سلول به فلز هستند [۱۰].

بنابراین بررسی توانایی حذف فلز توسط سلول‌های زنده در کنار بررسی توانایی جذب زیستی سلول غیر زنده حائز اهمیت است. در تحقیقی به مقایسه میزان جذب زیستی و تجمع زیستی فلزات سنگین در سلول‌های مرده و زنده باسیلوس اسفاریکوس پرداخته شده و مشاهده کردند که باکتری‌های زنده حدود ۲۵ درصد و باکتری‌های غیر زنده حدود ۴۴ درصد فلزات سنگین را حذف می‌کنند. آن‌ها جذب بیش‌تر فلزات سنگین توسط باکتری‌های غیر زنده را به نداشتن متابولیسم فعال و سازگاری با pH نسبت دادند [۱۱].

در تحقیقات بسیاری فرآیندهای جذب زیستی با بررسی توانایی سویه‌های میکروبی جهت جذب مس با استفاده از سلول‌های باکتریایی تثبیت شده و مرده و یا جلبک‌ها، قارچها و مخمرها و لجن فعال خشک مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است [۱۲-۱۶].

در مطالعه‌ای چهار میکروارگانیسم سازگار شده باسیلوس، سودوموناس، استافیلوکوکوس و قارچ اسپرژیلوس نیجر بررسی شده‌اند. از این میکروارگانیسم‌ها برای حذف مس استفاده شده است. در این تحقیق باکتری سودوموناس مس را ۶۸ درصد و همچنین باسیلوس مس را ۵۶ درصد و استافیلوکوکوس مس را ۴۲ درصد کاهش داد [۱۷]. در

رشد سلولی در طول این زمان با اندازه‌گیری OD₆₀₀ بررسی شده است [۱۹]. سلول‌های رشد داده شده در نیمه فاز لگاریتمی بکمک سانتریفیوژ ۴۰۰۰g (Froilabo SW14) جدا شده و شستشو شد.

گروه‌های عاملی روی سطح سلول به کمک طیف‌سنجی مادون قرمز (BRUKER- ALPHA FTIR) از ۴۰۰ تا 4000cm^{-1} و مورفولوژی سطح باکتری‌ها به کمک عکس میکروسکوپ الکترونی (MIRA TESCAN SEM) بررسی شد [۱۹]. در فرآیند تجمع زیستی توده باکتری زنده مورد استفاده قرار گرفته و جهت فرآیند جذب زیستی سلول‌های غیر فعال باکتری استفاده گردید. جهت غیر فعال‌سازی فیزیکی باکتری، سلول‌ها بمدت ۱۵ دقیقه در اتوکلاو با دمای ۱۲۱ سانتی‌گراد قرار گرفتند. در جذب زیستی سلول‌های اصلاح شده سودوموناس، به منظور بالا بردن توان جذب زیستی، سلول‌ها در مجاورت ۲۵ میلی‌لیتر محلول ۰/۵ نرمال از سدیم هیدروکسید به مدت ۱۵ دقیقه روی شیکر ۲۰۰rpm هم زده شدند و سپس به کمک سانتریفیوژ ۴۰۰۰g از محلول جدا شدند.

جهت بررسی بهترین شرایط فعالیت باکتری در انجام آزمایش‌های حذف مس pH بهینه ۷ و دمای بهینه ۳۷ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. بررسی سایر پارامترهای تاثیرگذار بر حذف زیستی مس، شامل غلظت اولیه یون مس (CuSO_4)، زمان تماس فلز و جاذب زیستی و همچنین دوز جاذب زیستی انجام شده است. در پایان حذف مس از نمونه‌های حقیقی پساب آبکاری فلزات، در شرایط بهینه هر سه فرآیند تجمع زیستی، جذب زیستی غیر فعال و جذب زیستی اصلاح شده بررسی و امکان بازیابی جاذب و بازیافت فلز مس مورد ارزیابی قرار گرفت. اندازه‌گیری غلظت فلز مس به کمک دستگاه اسپکتروسکوپی جذب اتمی (Shimadzu Atomic Absorption) انجام شد.

مطالعه‌ای باکتری‌های تثبیت شده و مقاوم به فلزات سنگین استفاده شدند و سلول‌های باسیلوس تثبیت شده ۹۶/۳۴ درصد و سلول‌های غیر زنده ۴۴/۷۳ درصد از مس را حذف نموده‌اند [۱۲].

مهم‌ترین فاکتور در مقایسه جاذب‌های زیستی با یکدیگر و سایر روش‌های حذف فلزات سنگین، ظرفیت جذب فلز است، در این خصوص بررسی شرایط بهینه از نقطه نظر غلظت اولیه فلز، نسبت جذب شونده به جاذب، زمان تماس با جاذب و pH که ظرفیت جذب را تحت تأثیر قرار می‌دهند، برای انجام مقایسه بین روش‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. مکانیزم‌های موثر در فرآیند جذب زیستی شامل جذب سطحی، تعویض یون و کیلاته کردن، اکسایش-کاهش و رسوب‌دهی میکرو است [۱۸]. با بررسی مکانیزم‌های واکنش فلز-سلول می‌توان فرآیند جذب زیستی را بهینه‌سازی نمود و میزان انتخاب پذیری حذف فلز را افزایش داد و همچنین می‌توان احیای جاذب زیستی و استفاده مجدد از آن که موجب کاهش هزینه‌های تصفیه شده و نیز امکان بازیافت فلزات جذب شده را فراهم آورد.

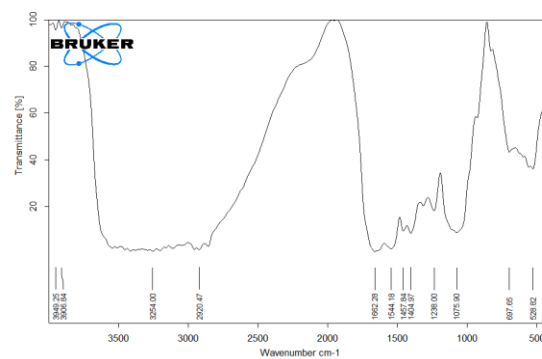
مواد و روش‌ها

در این پژوهش جهت حذف مس از سویه باکتریایی (*Pseudomonas aeruginosa*) که باکتری میله‌ای شکل، گرم منفی، متحرک، بدون اسپور، تازک‌دار، کاتالاز مثبت و اکسیداز مثبت هستند استفاده شد. سویه مورد نظر از کلکسیون میکروبی ایران (PTCC 1310) تهیه گردید. این باکتری در محیط کشت تریپتون سویا براث که در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه استریلیزه شده کشت داده شده است. محیط کشت و تمامی مواد شیمیایی از شرکت مرک تهیه و مورد استفاده قرار گرفته است. جهت کشت باکتری، سلول‌ها در ۵۰ میلی‌لیتر محیط کشت سویا براث به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد روی شیکر (IKA KS130 basic) با دور ۲۰۰rpm رشد داده شدند. روند

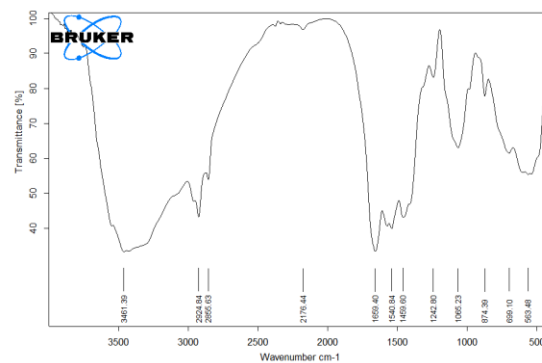
بحث و یافته‌ها

- طیف FT-IR باکتری سودوموناس

بررسی گروه‌های عاملی موجود در دیواره سلول باکتری مطابق با شکل ۱ می‌باشد. پیک 3254 cm^{-1} مربوط به گروه OH-کشتی و NH-کشتی نوع دوم است، که پیک 1622 cm^{-1} و 1544 cm^{-1} مربوط به گروه کربونیل آمیدی موجود در ساختار پروتئین‌ها در ناحیه 1662 cm^{-1} و کربونیل کشتی پلی‌ساکارید در 1057 cm^{-1} ظاهر شده، CH_2 -کشتی در ناحیه 2920 cm^{-1} و ارتعاش برشی CH_2 در ناحیه 1457 cm^{-1} و ارتعاش نوسانی آن در 528 cm^{-1} می‌باشد، پیک 1590 cm^{-1} مربوط به COO-کشتی نامتقارن و 1404 cm^{-1} کشتی متقارن گروه کربوکسیلیک اسید و ارتعاش خمشی کربوکسیلیک اسید در 697 cm^{-1} است. ارتعاش کشتی اتری C-O-C پلی‌ساکاریدها در ناحیه 1238 cm^{-1} می‌باشد.



شکل ۱: طیف FTIR باکتری سودوموناس آئروژینوزا



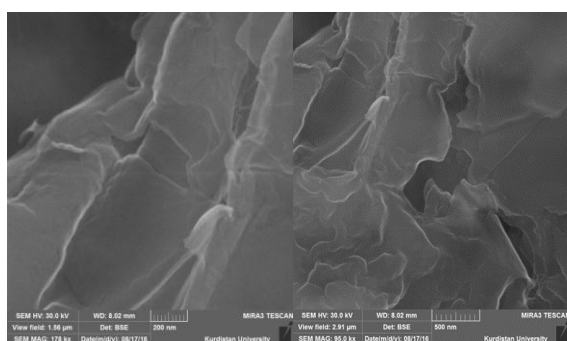
شکل ۲: طیف FTIR باکتری سودوموناس اصلاح شده با سود

نتایج مربوط به طیف FTIR باکتری سودوموناس اصلاح

شده به روش شیمیایی در شکل ۲ آورده شده است.

پیک $3461/39\text{ cm}^{-1}$ مربوط به OH-کشتی و NH-کشتی، پی‌های $2924/04\text{ cm}^{-1}$ و $2855/63\text{ cm}^{-1}$ مربوط به CH_2 -کشتی و CH_3 -کشتی، پیک $1659/4\text{ cm}^{-1}$ مربوط به C=O-آمید نوع اول، پیک $1540/84\text{ cm}^{-1}$ مربوط به NH-کشتی مربوط به آمید نوع دوم، پیک $1459/6\text{ cm}^{-1}$ مربوط به CH_2 -برشی، پیک $1242/8$ ارتعاش کشتی P=O-در گروه فسفات و گروه اتری در پل ساکارید، پیک $1065/23\text{ cm}^{-1}$ مربوط به C=O-کشتی در پل ساکارید و P=O-کشتی متقارن در فسفولیپیدها، پیک $874/39\text{ cm}^{-1}$ مربوط به O=C-O استری، پیک $699/1\text{ cm}^{-1}$ کشتی یا خمشی خارج صفحه C-OH، پیک $563/48\text{ cm}^{-1}$ مربوط به CH_2 -نوسانی است. پیک $1404/97\text{ cm}^{-1}$ مربوط به C=O-کشتی متقارن در COO-آمید اسیدها، پس از اصلاح ساختار مشاهده نمی‌شود. آمید نوع اول و دوم پس از اصلاح ساختار سطح تغییر مشخصی نداشته و گروه فسفات با توجه به تکرار پیک‌های گروه فسفات در 1238 و $1075/4$ که با شدت کم‌تری ظاهر شده‌اند، تغییری نداشته است.

-تصویر SEM باکتری سودوموناس



شکل ۳: تصویر SEM باکتری سودوموناس

تصویر SEM باکتری سودوموناس آئروژینوزا قبل و بعد از اصلاح ساختار در شکل ۳ و ۴ آورده شده است.

با توجه به جدول ۱، با افزایش غلظت فلز راندمان انباشتی فلز درون سلول افزایش می‌یابد، اما با گذشت زمان از آنجا که مسمومیت سلول زنده در تماس با فلز بیشتر می‌شود، بهترین حذف قبل از ۳۰ دقیقه انجام شده است و پس از آن مسمومیت سلول باعث کاهش توانایی تجمع فلز شده است. افزایش دوز جذب از ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌گرم در این مرحله تفاوت چندانی را ایجاد نموده است.

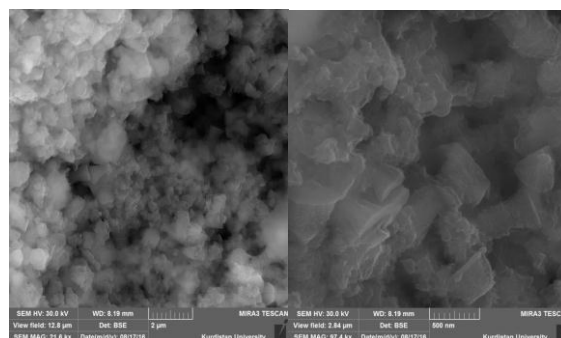
- بررسی توانایی جذب زیستی مس توسط باکتری غیر فعال شده با روش فیزیکی

توانایی باکتری سودوموناس در جذب یون‌های مس درون سلول‌های غیرفعال شده با روش فیزیکی (اتوکلاو) و غیرزنده در جدول ۲ نشان داده شده است. جدول ۲ تاثیرپذیری این فرآیند از پارامترهای غلظت اولیه فلز، دوز جذب و زمان مجاورت را مشخص می‌نماید.

جدول ۲- بررسی پارامترهای موثر بر جذب زیستی باکتری غیر فعال

انحراف استاندارد (S)	راندمان (E%)	غلظت تعادلی C _e (ppm)	دوز جذب (mg)	زمان تماس (min)	غلظت اولیه C ₀ (ppm)
±۰/۵۷	۱۶/۵۴	۳۳/۳۸	۰/۱	۶۰	۴۰
±۱/۳۳	۴۵/۱۵	۳۲/۹۱	۰/۱	۶۰	۶۰
±۰/۸۲	۵۹/۰۰	۳۲/۸۰	۰/۱	۶۰	۸۰
±۰/۲۵	۶۶/۶۱	۳۳/۳۸	۰/۱	۶۰	۱۰۰
±۰/۳۳	۶۵/۳۴	۳۴/۶۶	۰/۲	۶۰	۱۰۰
±۰/۳۱	۶۰/۷۰	۳۹/۳۰	۰/۳	۶۰	۱۰۰
±۰/۱۶	۵۸/۲۱	۴۱/۷۹	۰/۴	۶۰	۱۰۰
±۰/۲۴	۵۵/۹۴	۴۴/۰۵	۰/۵	۶۰	۱۰۰
±۰/۱۶	۷۱/۴۸	۲۸/۵۲	۰/۱	۱۵	۱۰۰
±۰/۵۰	۶۸/۷۷	۳۱/۲۳	۰/۱	۳۰	۱۰۰
±۰/۱۶	۶۶/۶۷	۳۳/۳۳	۰/۱	۴۵	۱۰۰
±۰/۱۶	۶۲/۰۲	۳۷/۹۷	۰/۱	۷۵	۱۰۰
±۰/۳۲	۶۱/۰۳	۳۸/۹۷	۰/۱	۹۰	۱۰۰
±۰/۱۶	۶۰/۷۰	۳۹/۳۰	۰/۱	۱۲۰	۱۰۰
±۰/۲۴	۶۰/۵۴	۳۹/۴۶	۰/۱	۱۸۰	۱۰۰

با توجه به جدول ۲، جذب سلول‌های غیر فعال با بالا رفتن غلظت اولیه فلز همچنان افزایش می‌یابد و افزایش دوز جذب از ۰/۱ تا ۰/۵ باعث کاهش آهسته راندمان جذب شده است



شکل ۴: تصویر SEM باکتری سودوموناس اصلاح شده با سود

مقایسه این تصاویر نشان‌دهنده افزایش سطح فعال در دسترس جهت جذب مس است.

- بررسی توانایی تجمع زیستی مس توسط باکتری

توانایی باکتری سودوموناس در انباشته نمودن یون‌های مس درون سلول‌های زنده در جدول ۱ نشان داده شده است. جدول ۱ تاثیرپذیری این فرآیند از پارامترهای غلظت اولیه فلز، دوز جذب و زمان مجاورت را مشخص می‌نماید.

جدول ۱- بررسی پارامترهای موثر بر تجمع زیستی مس توسط باکتری

انحراف استاندارد (S)	راندمان (E%)	غلظت تعادلی C _e (ppm)	دوز باکتری (mg)	زمان تماس (min)	غلظت اولیه C ₀ (ppm)
±۰/۶۳	۳۲/۱۵	۲۷/۱۴	۰/۱	۶۰	۴۰
±۰/۴۱	۵۰/۹۹	۲۹/۴	۰/۱	۶۰	۶۰
±۰/۷۲	۵۸/۸۲	۳۲/۹۴	۰/۱	۶۰	۸۰
±۰/۶۷	۶۴/۹۶	۳۵/۰۴	۰/۱	۶۰	۱۰۰
±۰/۱۶	۶۴/۵۱	۳۵/۴۸	۰/۲	۶۰	۱۰۰
±۰/۳۴	۶۱/۹۱	۳۸/۰۸	۰/۳	۶۰	۱۰۰
±۰/۳۴	۶۰/۴۸	۳۹/۵۲	۰/۴	۶۰	۱۰۰
±۰/۵۳	۵۵/۹۵	۴۴/۰۵	۰/۵	۶۰	۱۰۰
±۰/۳۴	۶۶/۴۵	۳۳/۵۵	۰/۱	۱۵	۱۰۰
±۰/۲۵	۶۸/۹۳	۳۱/۰۶	۰/۱	۳۰	۱۰۰
±۰/۶۹	۶۵/۱۸	۳۴/۸۲	۰/۱	۴۵	۱۰۰
±۰/۱۳	۶۲/۴۱	۳۷/۵۸	۰/۱	۷۵	۱۰۰
±۰/۱۸	۶۱/۳۱	۳۸/۶۹	۰/۱	۹۰	۱۰۰
±۰/۳۳	۵۴/۹۵	۴۵/۰۵	۰/۱	۱۲۰	۱۰۰
±۰/۰۹۷	۴۸/۴۸	۵۱/۵۱	۰/۱	۱۸۰	۱۰۰

با توجه به جدول ۳، راندمان سلول‌های اصلاح ساختار شده با سود به دلیل ایجاد سایت‌های فعال بیش‌تر جهت جذب یون‌های مثبت فلز، بیش‌تر از سلول‌های غیر فعال شده به روش فیزیکی است. نکته متفاوت در این فرآیند این است که بیشینه جذب در زمان‌های بالاتری اتفاق افتاده است (۷۵ دقیقه) و پدیده واجذب یون‌های جذب شده پس از این زمان رخ داده است. بنابراین تاثیر اصلاح شیمیایی این است که در حضور دوز جاذب یکسان سلول‌های غیر فعال در زمان‌های کم‌تر بیشینه جذب را نشان می‌دهند و سلول‌های اصلاح شده در زمان‌های بیش‌تر اما با راندمان بالاتری یون‌ها را جذب می‌کنند. بنظر می‌رسد در صورتی که بازیافت فلزات گرانبها و سرعت جذب مد نظر باشد استفاده از روش فیزیکی جهت غیر فعال نمودن سلول‌ها هر چند که راندمان تا حدودی کم‌تر دارد مفیدتر واقع خواهد شد و در صورتی که راندمان بالای حذف در غلظت‌های بسیار زیاد فلز در پساب مورد نظر است روش اصلاح ساختار کارایی بالاتری خواهد داشت. روش تجمع زیستی فلز نیز چنانچه مسمومیت فلزی مطرح نباشد و مطابقت سلول زنده با فلز در زمان‌های کوتاهی اتفاق بیفتد، مانند روش جذب زیستی غیر فعال، مفید خواهد بود. در این بررسی راندمان سلول زنده در زمان‌های قبل از ۳۰ دقیقه که مسمومیت فلزی ایجاد نشده است معادل با جذب سلول‌های غیر زنده است. بنابراین این تصور که جذب زیستی همواره و در تمام انواع سلول‌ها و در تمام شرایط بطور مشخصی بهتر از تجمع زیستی سلول‌های زنده عمل می‌کند منتفی خواهد بود. همچنین بازیابی جاذب‌های مورد استفاده در هر فرآیند نشان دهنده عدم کاهش قابل توجه در توانایی این جاذب‌ها در حذف مس تا سه بار استفاده مجدد می‌باشد و همچنین بازیافت مس پس از شستشوی جاذب با اسید هیدروکلریک (۰/۱ نرمال) با راندمان ۵۶/۰۳ درصد امکان پذیر است.

- سینتیک حذف مس توسط باکتری سودوموناس سینتیک جذب برای تعیین مکانیسم کنترل کننده فرآیندهای جذب و همچنین بررسی سرعت فرآیند حذف مس توسط جاذب استفاده می‌شود. به این جهت پارامترهای بدست آمده

دلیل این مسئله در ایجاد ممانعت فضایی سلول‌های بیش از اندازه باکتری و عدم دسترسی یون فلزی به سایت‌های فعال جهت جذب بر روی سطح دیواره سلول غیر فعال است. با افزایش زمان راندمان دچار کاهش با روند آهسته شده و به نظر می‌رسد بیش‌ترین جذب سطحی در همان زمان‌های کم‌تر از ۱۵ دقیقه اتفاق افتاده و پس از آن روند واجذب سلول شروع شده است. بنابراین در مقایسه با تجمع زیستی، بیشینه جذب سطحی سلول غیر زنده در زمان‌های کم‌تری آغاز شده و واجذب سریع فلز نشان دهنده امکان بازیابی سریع جاذب و بازیافت بهینه فلز در زمان بسیار اندک است.

- بررسی توانایی جذب زیستی مس توسط باکتری

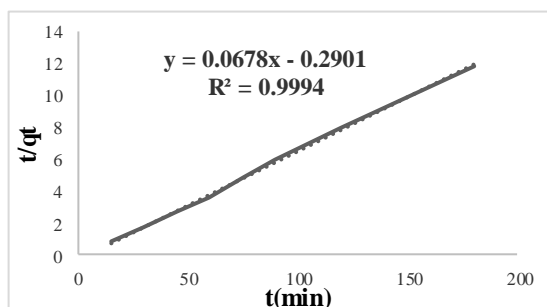
اصلاح ساختار شده به روش شیمیایی

توانایی باکتری سودوموناس در جذب یون‌های مس درون سلول‌های اصلاح شده با روش شیمیایی (سود) و غیرزنده در جدول ۳ نشان داده شده است. جدول ۳ تاثیرپذیری این فرآیند از پارامترهای غلظت اولیه فلز، دوز جاذب و زمان مجاورت را مشخص می‌نماید.

جدول ۳- بررسی پارامترهای موثر بر جذب زیستی باکتری اصلاح شده

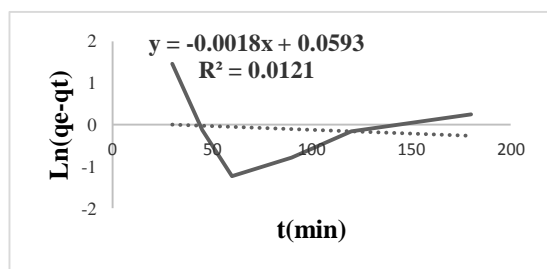
غلظت اولیه C_0 (ppm)	زمان تماس (min)	دوز باکتری (mg)	غلظت تعادلی C_e (ppm)	راندمان (E%)	انحراف استاندارد (S)
۴۰	۶۰	۰/۱	۲۹/۱۳	۲۷/۱۸	±۰/۸۵
۶۰	۶۰	۰/۱	۲۷/۶۹	۵۳/۸۴	±۰/۲۸
۸۰	۶۰	۰/۱	۲۶/۵۸	۶۶/۷۷	±۰/۶۶
۱۰۰	۶۰	۰/۱	۲۴/۹۲	۷۵/۰۷	±۰/۲۵
۱۰۰	۶۰	۰/۲	۲۶/۹۱	۷۳/۰۸	±۰/۲۵
۱۰۰	۶۰	۰/۳	۲۷/۶۹	۷۲/۳۱	±۰/۳۹
۱۰۰	۶۰	۰/۴	۲۹/۰۲	۷۰/۹۸	±۰/۳۳
۱۰۰	۶۰	۰/۵	۳۰/۱۸	۶۹/۸۲	±۰/۱۶
۱۰۰	۱۵	۰/۱	۶۳/۳۴	۵۷/۷۷	±۰/۲۵
۱۰۰	۳۰	۰/۱	۴۱/۰۱	۵۸/۹۹	±۰/۵۰
۱۰۰	۴۵	۰/۱	۲۷/۲۵	۷۲/۷۵	±۰/۳۴
۱۰۰	۷۵	۰/۱	۲۳/۷۶	۷۶/۲۳	±۰/۲۵
۱۰۰	۹۰	۰/۱	۲۵/۵۳	۷۶/۴۶	±۰/۶۸
۱۰۰	۱۲۰	۰/۱	۲۷/۱۴	۷۲/۸۶	±۰/۳۳
۱۰۰	۱۸۰	۰/۱	۲۸/۹۱	۷۱/۰۹	±۰/۳۴

نمودار ۲-الف: سینتیک شبه درجه ۱ در فرآیند جذب زیستی غیر فعال

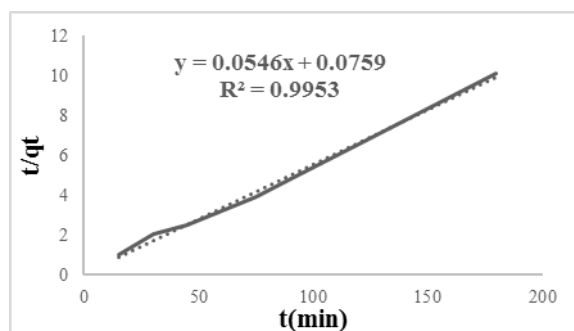


نمودار ۲-ب: سینتیک شبه درجه ۲ در فرآیند جذب زیستی غیر فعال

بر اساس میزان ضریب همبستگی داده‌ها (R^2) در مقایسه این دو نمودار، سینتیک شبه درجه ۲ با فرآیند جذب زیستی تطابق بیشتری دارد. نمودار ۳ (الف-ب)، به ترتیب سینتیک شبه درجه ۱ و ۲ در جذب زیستی مس توسط سلول غیرزنده و اصلاح شده با سود را نمایش می‌دهد.



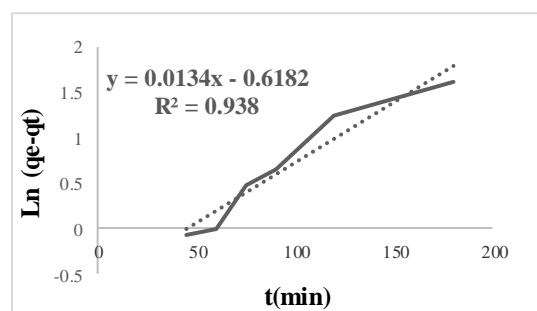
نمودار ۳-الف: سینتیک شبه درجه ۱ در فرآیند جذب زیستی اصلاح شده



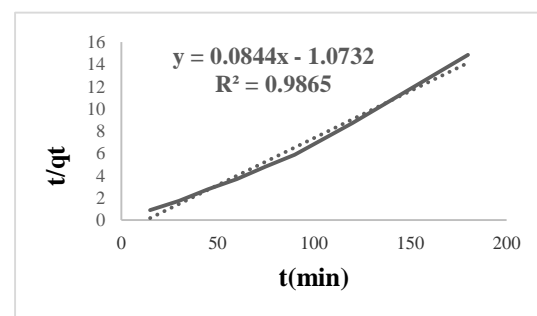
نمودار ۳-ب: سینتیک شبه درجه ۲ در فرآیند جذب زیستی اصلاح شده

در هر سه فرآیند از سینتیک شبه درجه ۲ که نشان دهنده جذب چند لایه فلز بر روی جاذب است تبعیت می‌کند. بر اساس میزان ضریب همبستگی داده‌ها (R^2) در مقایسه این دو

از بررسی زمان تماس در فرآیندهای جذب و تجمع زیستی با مدل‌های سینتیک شبه درجه ۱ و ۲ مطابقت داده شده‌اند. نمودار ۱ (الف-ب)، به ترتیب سینتیک شبه درجه ۱ و ۲ در تجمع زیستی مس توسط سلول زنده باکتری را نمایش می‌دهد.

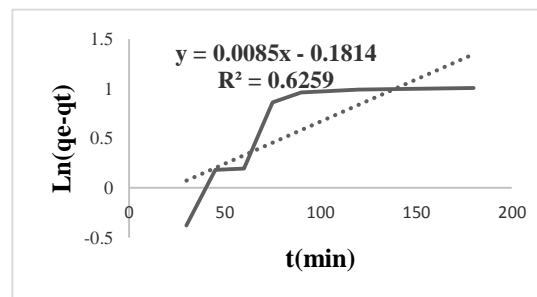


نمودار ۱-الف: سینتیک شبه درجه ۱ در فرآیند تجمع زیستی مس



نمودار ۱-ب: سینتیک شبه درجه ۲ در فرآیند تجمع زیستی مس

بر اساس میزان ضریب همبستگی داده‌ها (R^2) در مقایسه این دو نمودار، سینتیک شبه درجه ۲ با فرآیند تجمع زیستی تطابق بیشتری دارد. نمودار ۲ (الف-ب)، به ترتیب سینتیک شبه درجه ۱ و ۲ در جذب زیستی مس توسط سلول غیر زنده و غیر فعال شده فیزیکی را نمایش می‌دهد.



راندمان این روش را به مقدار عددی راندمان جذب سلول-های غیر زنده در دو روش دیگر نزدیک نموده است.

جدول ۵- بررسی توانایی حذف مس از نمونه پساب حقیقی

راندمان (%)	غلظت تعادلی (ppm)	زمان مجاورت (min)	دوز باکتری (mg)	نوع فرایند
۹۶/۵۳	۳/۴۶۵	۳۰	۰/۱	تجمع زیستی
۹۹/۴۳	۰/۵۶۷	۱۵	۰/۱	جذب زیستی غیرفعال
۹۹/۶۸	۰/۳۱۴	۷۵	۰/۱	جذب زیستی اصلاح شده

همچنین هر دو روش جذب زیستی راندمان‌های بالاتری از شرایط آزمایشگاهی و محلول‌های سنتزی مس داشته‌اند که این مسئله دلیلی بر احتمال وجود یون‌های رقابت کننده در پساب حقیقی و جذب رقابتی یون‌های فلزی می‌باشد. همچنین احتمال حضور برخی مواد شیمیایی در پساب در راستای ایجاد مکان‌های فعال بیش‌تر با بار منفی جهت جذب مس امکان پذیر است.

نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، بررسی مقایسه‌ای توان تجمع زیستی و جذب زیستی سلول باکتری سودوموناس اثرورژینوزا در حذف مس از محلول‌های مائی و پساب‌های حقیقی حاوی مس است. روش‌های متفاوتی تاکنون موفق به حذف مس با راندمان‌های بسیار بالایی شده‌اند و هدف تکرار روشی مشابه نبوده است. هدف این تحقیق بررسی امکان پذیری استفاده از سلول‌های فعال و زنده باکتری‌ها در محیط مسموم فلزی است که در اثر تطابق سلول/فلز، امکان حذف آلودگی با درصد بالا و بدون نیاز به کشت‌های متوالی سلول‌ها و تزریق مجدد آن‌ها به پساب حاصل می‌شود، چنانکه در این تحقیق تجمع زیستی سلول زنده در زمان‌های بسیار کوتاه‌تر از سلول غیر فعال، با دوز یکسان باکتری اولیه و با راندمان نزدیک به روش‌های جذب زیستی حاصل شد. هدف دیگر این تحقیق بررسی نقش و تفاوت پیش تصفیه شیمیایی و فیزیکی سلول-های باکتری قبل از فرآیند جذب است. نتایج حاصل نشان

نمودار، کاملاً مشخص است که سینتیک شبه درجه ۱ از حالت خطی تبعیت نکرده و سینتیک شبه درجه ۲ با فرایند جذب زیستی سلول‌های اصلاح شده تطابق کامل دارد. بنابراین حذف مس توسط باکتری سودوموناس اثرورژینوزا در هر سه فرایند مطابق جدول ۴ از سینتیک شبه درجه ۲ یعنی جذب چند لایه مس بر سلول باکتری پیروی می‌کند. با توجه به جدول ۲ مقدار Q_e محاسبه شده از معادله سینتیک شبه درجه ۲ از نمودار هر سه فرآیند، به مقادیر واقعی Q_e حاصل از آزمایش‌های تجربی کاملاً نزدیک است که این مسئله تأییدی بر تبعیت حذف مس از سینتیک شبه درجه ۲ دارد.

جدول ۴- پارامترهای سینتیکی حذف مس توسط باکتری سودوموناس

مرتبه سینتیک	نوع فرایند	K (1/min)	Q_e (mg/g)	R^2
شبه درجه اول	تجمع زیستی	-۰/۰۱۳۴	۰/۵۳۸۹	۰/۹۳۸
	جذب زیستی غیرفعال	-۰/۰۰۸۵	۰/۸۳۴۱	۰/۶۲۶
	جذب زیستی اصلاح شده	۰/۰۰۱۸	۱/۰۶۱۱	۰/۰۱۲
شبه درجه دوم	تجمع زیستی	-۰/۰۰۶۶	۱۱/۸۴۸	۰/۹۸۶
	جذب زیستی غیرفعال	-۰/۰۱۵۸	۱۴/۷۴۹	۰/۹۹۹
	جذب زیستی اصلاح شده	۰/۰۳۹۳	۱۸/۳۱۵	۰/۹۹۵

- بررسی توانایی حذف مس از نمونه پساب حقیقی شرایط بهینه بدست آمده از سه فرآیند مورد بررسی جهت ارزیابی توانایی تجمع و جذب زیستی مس توسط سلول‌های فعال و غیر فعال در مجاورت نمونه حقیقی از پساب صنایع آبکاری مس بکار گرفته شده‌اند. نتایج این بررسی در جدول شماره ۵ بصورت خلاصه آورده شده‌اند.

با توجه به جدول ۵، جذب سلول‌های اصلاح شده در محیط قلیایی در نمونه حقیقی پساب با pH حدود ۷ و دمای ۳۷ درجه و دوز جاذب یکسان از سلول‌های فعال و غیر فعال، بهترین راندمان را داشته‌اند. بنظر می‌رسد حضور همزمان سایر یون‌ها و مواد الی موجود در پساب حقیقی نقش تقویت کنندگی برای سلول‌های زنده داشته و به فرآیند تجمع زیستی این سلول‌ها در حذف مس کمک نموده‌اند، چنان که مقدار

- [3] K, Vijayaraghavan., Y, Yun., 2008, Bacterial biosorbents and biosorption. *Biotechnology Advances*, 26, 266-291.
- [4] L, Velásquez., J, Dussan., 2009, Biosorption and bioaccumulation of heavy metals on dead and living biomass of *Bacillus sphaericus*. *Hazardous Materials*, 167, 713-716.
- [5] Q, Huang., W, Chen., L, Xu., 2005, Adsorption of copper and cadmium by Cu- and Cd-resistant bacteria and their composites with soil colloids and kaolinite. *Geomicrobiology*, 22, 227-236.
- [6] S, Ozdemir S., E, Kilinc., A, Poli., B, Nicolaus., K, Guve., 2009, Biosorption of Cd, Cu, Ni, Mn and Zn from aqueous solutions by thermophilic bacteria, *Geobacillus thermoautotrophicus* sp. *stromboliensis*: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Chemical Engineering*. 14, 1-47.
- [7] B, Deeb., A, Altalhi., 2009, Degradative plasmid and heavy metal resistance plasmid naturally coexist in phenol and cyanide assimilating bacteria. *American J. Biochemistry and Biotechnology*. 5, 84-93.
- [8] A, Jabbari Nezhad Kermani., M, Faezi., A, Khosravan., A, Farahmand., M, Shakibaei., 2010, Cadmium bioremediation by metal-resistant mutated bacteria isolated from active sludge of industrial effluent. *Iranian J. Environmental Health Science and Engineering*. 7, 279-286.
- [9] M, Marlin., S, Tacata., G, Ray., C, Trinidad., 2007, Biosorption of copper, cadmium and lead by copper resistant bacteria isolated from Mogpog river, Marinduque. *Philippine J. Science*. 136, 155-165.
- [10] S, Zafar., F, Aqi., I, Ahmad., 2007, Metal tolerance and biosorption potential of filamentous fungi isolated from metal contaminated agricultural soil. *Bioresource Technology*. 98 , 2557-2561.
- [11] L, Velásquez., J, Dussan., 2009, Biosorption and bioaccumulation of heavy metals on dead and living biomass of *Bacillus sphaericus*. *Journal of hazardous materials*, 167, 713-716.
- [12] R.M, Johny., B, Hemambika., J, Hemapriya., V, Rajesh Kannan., 2010, Comparative assessment of heavy metal removal by immobilized and dead bacterial cells: A biosorption approach. *African Journal of Environmental Science and Technology* 4, 077-083.
- [13] H, Salman., I.M, Abbas., Ismail, T.M., A, Mostafa., H.S, Abbas., 2014, Biosorption of Heavy Metals: A Review. *Journal of Chemical Science and Technology* 3, 74-102.
- [14] H, Zare., H, Heydarzade., M, Rahimnejad., A, Tardast., M, Seyfi., M, Peyghambarzadeh., 2015, Dried activated sludge as an appropriate biosorbent for removal of copper (II) ions. *Arabian Journal of Chemistry* 8, 858-864.
- [15] A, Al-Homaidan., H, Al-Houri., A, Al-Hazzani., G, Elgaaly., N, Moubayed., 2014, Biosorption of copper ions from aqueous solutions by *Spirulina platensis* biomass. *Arabian Journal of Chemistry* 7, 57-62.
- [16] M, Bilal., A, Jehanzeb., T, Ashfaq., M, Gardazi., A, Tahir., P, Arshid., H, Hajira., M, Qaisar., 2013, Waste biomass adsorbents for copper removal from industrial wastewater—A review. *Journal of Hazardous Materials* 263, 322-333.
- [17] K, Ashok., S, Balwant., J, Vishnu Datt., 2010, Biosorption of Heavy Metals by four acclimated microbial species, *Bacillus* spp *Pseudomonas* spp., *Staphylococcus* spp. and *Aspergillus niger*. *J. Biology and Environmental Science*. 4, 97-108.
- [18] R, Gupta., P, Ahuja., S, Khan., R. K, Saxena., H, Mohapatra., 2000, Microbial biosorbents: meeting challenges of heavy metal pollution in aqueous solutions. *Current science* , 967-973.
- [19] A. M, Karimi., S, Sadeghi., F, Salimi., 2017, Biodesulphurization of thiophene as a sulphur model compound in crude oils by *Pseudomonas aeruginosa* supported on polyethylene. *Ecological Chemistry and Engineering S*. 24, 371-379.

دهنده این است که هرچند راندمان سلول‌های اصلاح شده شیمیایی بالاتر بوده است اما جذب بالای سلول‌های غیرفعال شده فیزیکی در زمان‌های بسیار کوتاه‌تر و با راندمانی نزدیک به سلول‌های اصلاح شده شیمیایی انجام می‌شود. بنابراین این تصور غالب که در همه شرایط و انواع آلودگی‌ها و جاذب-ها، همواره بکاربردن روش جذب زیستی بهتر از تجمع پذیری است، صحیح نمی‌نماید و در خصوص آلودگی‌های مختلف، امکان بررسی بیش‌تر در جهت تلفیق روش‌ها و سازگاری میکروارگانسیم زنده با شرایط موجود و حاصل شدن بهترین راندمان در کم‌ترین زمان ممکن و بدون نیاز به کشت‌های متوالی و نگهداشتن سلول زنده و بدون تنظیم شرایط دما و pH وجود خواهد داشت.

هدف نهایی بازیافت فلز مس بوده است که در روش‌های جذب زیستی براحتی با واجذب سریع سلول‌ها در زمان‌های کوتاه اولیه پس از جذب حاصل شده و جاذب بازیابی شده به دفعات بدون کاهش قابل توجهی در توانایی جذب، مورد استفاده مجدد قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از نمونه حقیقی پساب آبکاری مس نشان دهنده افزایش راندمان سلول در حضور یون‌های رقابتی است، که کارایی بالا و اختصاصی این جاذب را در تصفیه پساب‌های شیمیایی حاوی فلز سنگین مس در فرآیندهای تجمع‌پذیری و جذب زیستی مشخص می‌نماید.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از نتایج پایان نامه کارشناسی ارشد با عنوان سنجش مقایسه‌ای توان تجمع زیستی و جذب زیستی باکتری پسودوموناس اصلاح شده به منظور امکان سنجی حذف مس از پساب‌های صنعتی می‌باشد که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه به انجام رسیده است که بدین وسیله از حمایت‌های این واحد دانشگاهی تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- [1] B, Volesky., 1990, Biosorption of heavy metals. CRC press.
- [2] B, Volesky., 2001, Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy*, 59, 203-216.