



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Biosorption of lead heavy metal from aqueous solutions using *spirulina* microalgaeShirin Izadi¹, Mahnaz sadat Sadeghi^{2*}

1. MSc Marin Biotechnology, Faculty of Marine Science and Technology, Islamic Azad University Tehran North Branch, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Faculty of Marine Science and Technology, Islamic Azad University Tehran North Branch, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2022/06/25

Revised: 2023/03/5

Accepted: 2023/01/5

Keywords:

Spirulina Platensis

Lead

Heavy Metal

Biosorption

Absorption Isotherm

*Corresponding author:

m_sadeghi@iau-tnb.ac.ir

0000-0002-2177-0624

Doi: 10.52547/joc.13.51.4

Dor: 20.1001.1.15621057.1401.13.52.4.9

ABSTRACT

Background and Objectives: Today, the removal of heavy metals from industrial effluents is significantly increasing, which can play an important role in protecting the environment and human health. In recent years, researchers have resorted to biological methods, especially biological and microbial methods to remove toxic heavy metals. Biosorption of heavy metals is a relatively new technology for the treatment of industrial effluents, and its purpose is to remove toxic metals and clean the environment, as well as recycle precious metals. This process is a rapid reaction between the metal and the cell surface (extracellular bonding) in which the metal adheres to the surface of molecules like a surface protein. Conventional biological processes in the biological purification of metals are biosorption, bioaccumulation and bio-sedimentation. In the present study, *spirulina platensis* ability to absorb heavy metal lead from aqueous solutions was investigated by optimizing the absorption conditions for live *spirulina* microalgae. The aim of the present study is to provide a solution for biological removal of lead heavy metal using biosorption method using spirulina microalgae.

Methods: Three parameters of algae concentration (0.5, 1, 1.5 and 2 g/l), lead concentration (20, 40 and 60 mg/l) and contact time (30, 60, 90, 180 and 360 minutes) was considered as experimental parameters. In order to perform the tests, 12 culture samples were placed. By examining the growth rate and after the cultures reached the desired concentration, three concentrations of lead were added to the samples and after certain periods of time, the culture was sampled and the adsorption rate was measured. The adsorption isotherm was then plotted to determine the theoretical capacity of the contaminant absorption.

Findings: The results showed that the optimum growth occurred in light conditions of 3000 lux and pH 10 and the maximum optical density was 1.421. The results showed that higher concentrations of algae had a higher rate of biosorption and the maximum absorption efficiency was obtained at a concentration of 2 g/l spirulina. Examination of contact time effect shows that by increasing contact time up to 180 minutes, the amount of biosorption increases and then decreases. The maximum removal of heavy metal was 81.33% and occurred at a concentration of 2 g/l spirulina and a dose of 20 mg/l lead in a contact time of 180 minutes. The results showed that the Langmuir isotherm could fit the experimental data better than other models.

Conclusion: The process of biological adsorption by *spirulina* consists of two stages of rapid absorption (first 20 minutes) and slow absorption thereafter. The absorption efficiency is upward for about 60 minutes and then gradually decreases, which is probably due to the toxicity of the remaining heavy metal on spirulina microalgae cells. Also, the high absorption rate in the first 30 minutes (more than 50% of the total biological absorption in all samples) indicates the existence of a rapid absorption phase in the first minutes. The reason for the rapid absorption in the first 30 minutes is due to the rapid physical adsorption at the active sites of the algal cell, known as the negative sites, and the adsorption occurs by electrostatic force.



NUMBER OF TABLES

6



NUMBER OF FIGURES

5



NUMBER OF REFERENCES

25

جذب بیولوژیکی فلز سنگین سرب از محلول‌های آبی با ریز جلبک *Spirulina*شیرین ایزدی^۱، مهناز سادات صادقی^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد زیست فناوری- دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی-گروه بیولوژی دریا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

۲. استادیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۴

تاریخ بازبینی: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

واژگان کلیدی:

اسپیرولینا پلاتنسیس

سرب

فلز سنگین

جذب بیولوژیکی

ایزوترم جذب

*نویسنده مسئول:

m_sadeghi@iau-tnb.ac.ir

0000-0002-2177-0624

Doi: 10.52547/joc.13.51.4

Dor:20.1001.1.15621057.1401.13.52.4.9

پیشینه و اهداف: امروزه حذف فلزات سنگین از پساب صنایع به طور قابل توجهی رو به افزایش است که می‌تواند در راستای حفاظت محیط زیست و سلامت انسان‌ها نقش به‌سزایی داشته باشد. در سال‌های اخیر محققین به روش‌های روش‌های بیولوژیکی و به خصوص روش‌های زیستی و میکروبی جهت حذف فلزات سنگین سمی متوسل شده‌اند. جذب زیستی فلزات سنگین، یک تکنولوژی نسبتاً جدید برای تصفیه پساب‌های صنعتی است و هدف از آن، حذف فلزات سمی و پاکسازی محیط زیست و همچنین بازیافت فلزات با ارزش است. این فرآیند، یک واکنش سریع بین فلز و سطح سلول (اتصال خارج از سلولی) است که فلز به سطح مولکول‌ها مانند پروتئین سطحی می‌چسبد. فرآیندهای فرآیند بیولوژیکی مرسوم در پاکسازی زیستی فلزات شامل جذب بیولوژیکی، تجمع زیستی و ته نشینی زیستی است. در پژوهش حاضر تلاش بر این است که با بهینه‌سازی شرایط جذب برای ریزجلبک *اسپیرولینا* به صورت زنده توانایی آن در جذب فلز سنگین سرب از محلول پاش آبی مورد بررسی قرار گیرد. هدف از این تحقیق ارائه راهکاری جهت حذف زیستی فلز سنگین سرب با استفاده از روش جذب بیولوژیکی به کمک ریزجلبک *اسپیرولینا* است.

روش‌ها: سه پارامتر غلظت جلبک (۰.۵، ۱، ۱.۵، ۲ گرم بر لیتر)، غلظت سرب موجود در نمک سرب نیترات (۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر) و زمان تماس (۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ دقیقه) به عنوان پارامترهای آزمایش نهایی در نظر گرفته شد. به منظور انجام تست‌ها، ۱۲ نمونه کشت گذاشته شد. با بررسی میزان رشد و بعد از رسیدن کشت‌ها به غلظت مورد نظر سه غلظت سرب به نمونه‌ها اضافه شده و پس از مدت زمان‌های معین از کشت نمونه برداری شده و میزان جذب اندازه‌گیری شد. در ادامه ایزوترم جذب برای تعیین ظرفیت تثبیتی جذب آلاینده رسم شد.

یافته‌ها: بررسی رشد جلبک در محدوده‌ی نور ۱۵۰۰ تا ۴۵۰۰ لوکس و پی‌اچ ۹ تا ۱۱ بررسی شد که بهینه‌ی رشد در شرایط نور ۳۰۰۰ لوکس و پی‌اچ ۱۰ رخ داده و ماکزیمم چگالی نوری رشد در این شرایط ۱،۴۲۱ بود. نتایج جذب بیولوژیکی نشان داد که غلظت‌های بالاتر جلبک میزان جذب بیولوژیکی بالاتری داشته و ماکزیمم راندمان جذب در غلظت ۲ گرم بر لیتر *اسپیرولینا* به دست آمد. بررسی اثر زمان تماس نشان داد که با افزایش زمان تماس میزان جذب بیولوژیکی افزایش یافته و از حدود ۱۸۰ دقیقه به بعد این میزان کاهش یافت. حداکثر حذف فلز سنگین سرب در غلظت ۲ گرم بر لیتر *اسپیرولینا* و غلظت سرب ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر در مدت زمان تماس ۱۸۰ دقیقه به میزان ۸۱،۳۳ درصد بود. نتایج نشان داد که ایزوترم لانگمویر برای فلز سرب، بهتر از سایر مدل‌ها می‌تواند داده‌های آزمایشی را برازش کند.

نتیجه‌گیری: فرآیند جذب بیولوژیکی توسط *اسپیرولینا* شامل دو مرحله‌ی سریع جذب (۲۰ دقیقه اول) و جذب آهسته در ادامه آن است. راندمان جذب تا حدود دقیقه‌ی ۶۰ صعودی بوده و پس از آن به تدریج از شیب آن کاسته می‌شود که احتمالاً به دلیل اثر سمیت فلز سنگین باقیمانده بر سلول‌های ریز جلبک *اسپیرولینا* است. همچنین میزان جذب بالا در ۳۰ دقیقه‌ی اول (بیش از ۵۰ درصد جذب بیولوژیکی کل در همه‌ی نمونه‌ها) نشان دهنده‌ی وجود یک مرحله جذب سریع در دقایق اولیه است. دلیل جذب سریع در ۳۰ دقیقه‌ی اول به دلیل جذب فیزیکی سریع در سایت‌های فعال سلول جلبک بوده که به سایت‌های منفی مشهور است و جذب با نیروی الکترواستاتیکی رخ می‌دهد.

مقدمه

سیستم‌های کشت ریزجلبک نیز می‌توانند نقش بسزایی در تصفیه پساب‌ها ایفا نمایند [۱].

در سال‌های اخیر استفاده از توده‌های زیستی مختلف به خصوص ریزجلبک‌ها برای حذف فلزات سنگین از پساب‌ها مورد توجه قرار گرفته است. هزینه کم و انطباق با محیط زیست عوامل مهمی هستند که استفاده از روش‌های زیستی برای تصفیه فلزات سنگین را مورد پذیرش و کانون توجه جوامع مختلف قرار داده است [۹]. روش‌های زیستی مزایایی همچون هزینه‌های عملیاتی کم، حذف انتخابی برای فلز مشخص، کمترین مصرف مواد شیمیایی (در نتیجه لجن تولیدی) و راندمان بالا برای غلظت‌های کم فلزات دارند. جذب زیستی فلزات سنگین، یک تکنولوژی نسبتاً جدید برای تصفیه پساب‌های صنعتی است و هدف از آن، حذف فلزات سمی و پاکسازی محیط زیست و همچنین بازیافت فلزات با ارزش است. این فرآیند، یک واکنش سریع بین فلز و سطح سلول (اتصال خارج از سلولی) است که فلز به سطح مولکول‌ها مانند پروتئین سطحی^۴ می‌چسبد [۱۰]. این اتصال بر اساس یک یا ترکیبی از فرآیندهای جذب فیزیکی، نیروهای واندروالس، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی، تبادل یون، تشکیل کمپلکس یا رسوب در مقیاس میکرو^۵ اتفاق می‌افتد [۱۱].

جلبک‌ها نوعی زیست توده‌ی زنده بوده که خواص اصلاح زیستی شگفت‌انگیزی دارند. جلبک‌ها به دو دسته چندسلولی (ماکروجلبک)^۶ و تک سلولی (ریزجلبک)^۷ تقسیم می‌شوند. جلبک‌های میکروسکوپی (ریزجلبک) از قدیمی‌ترین ساکنان اقیانوس‌ها و آب‌های شیرین به شمار می‌روند و نقش بسیار مهم و کلیدی را در اکوسیستم آبی ایفا می‌کنند. ریزجلبک‌ها به علت ساختار ساده‌ی خود می‌توانند با سرعت زیادی رشد کنند. ریزجلبک‌ها نخستین سطح از زنجیره غذایی اکوسیستم‌های آبی را تشکیل می‌دهند [۱]. ظرفیت ریزجلبک برای حذف فلزات سنگین به طور عمده به جذب فلز بر روی دیواره‌ی سلولی نسبت داده می‌شود که با تشکیل جاذبه الکترواستاتیک و کمپلکس همراه است [۱۲].

بر اساس تخمین‌ها حدود ۱۴ میلیون گونه جلبک تا امروز شناسایی شده است که بیشتر آن‌ها در گروه ریزجلبک‌ها با ابعاد میکروسکوپی قرار دارد. سیانوباکتری‌ها نیز گروهی از جانداران پروکاریوت شبیه به باکتری‌ها هستند که پیش از این در گروه جلبک‌های سبز آبی طبقه بندی می‌شدند، اما امروزه در سلسله مونرا و گروه آرکئوباکتری‌ها طبقه بندی می‌شوند [۱۳].

محیط‌های آبی، هوا و خاک به عنوان بسترهای دریافت کننده‌ی آلاینده‌ها شناخته می‌شوند. یکی از این آلاینده‌ها فلزات سنگین بوده که به دنبال فعالیت‌های صنعتی و توسعه‌ی تکنولوژی به طور مداوم در حال افزایش است [۱]. فلزات سنگین تمایل به تجمع در ارگانسیم‌های زنده دارند. امروزه حذف فلزات سنگین از پساب صنایع به طور قابل توجهی رو به افزایش است که می‌تواند در راستای حفاظت محیط زیست و سلامت انسان‌ها نقش به‌سزایی داشته باشد [۲]. فلزات سنگین از آلاینده‌های جدی محیط زیست به شمار می‌روند که به طرق مختلف و متعدد با منشا طبیعی و انسانی به محیط زیست وارد شده و از فراوانی بالایی در محیط‌های طبیعی برخوردار است [۳]. فلزات سنگین به‌عنوان یکی از گروه‌های اصلی آلاینده‌ها، از راه‌های مختلف نظیر پساب‌های شهری، کشاورزی و فاضلاب‌های صنعتی و بیمارستانی وارد رودخانه‌ها شده و خسارات جبران‌ناپذیری را بر موجودات زنده و اکوسیستم آن محیط وارد می‌کند [۴]. آلودگی آب با فلزات سنگین به لحاظ خواص شیمیایی، به صورت دائمی و پایدار بوده و قابلیت تجمع و انباشته شدن را دارد. فلز سرب عنصر ۸۲ جدول تناوبی و فلزی است براق، انعطاف‌پذیر، بسیار نرم، چکش خوار و به رنگ سفید مایل به آبی که از خاصیت رسانای الکتریکی پایینی برخوردار است. سرب سنگین‌ترین عنصر پایدار در طبیعت بوده و به طور طبیعی در محیط زیست وجود دارد ولی در اکثر موارد حاصل فعالیت‌های بشری است [۵].

فناوری‌های سنتی که در حال حاضر برای حذف فلز استفاده می‌شود می‌شامل رسوب، جذب شیمیایی، کاهش اکسیداسیون و استفاده از رزین‌های تبادل یونی است که دارای معایب قابل توجهی از جمله حذف ناقص فلزات، هزینه بالا و تولید لجن سمی است [۶]. روش‌های فیزیکی و شیمیایی برای تصفیه‌ی مقدار زیادی آب و فاضلاب حاوی فلزات سنگین در غلظت کم به شدت گران و پرهزینه بوده و در مقیاس صنعتی قابل استفاده نمی‌باشد.

در سال‌های اخیر محققین به روش‌های بیولوژیکی و به خصوص روش‌های زیستی و میکروبی جهت حذف فلزات سنگین سمی متوسل شده‌اند. فرآیند‌های بیولوژیکی مرسوم در پاکسازی زیستی فلزات شامل جذب بیولوژیکی^۱، تجمع زیستی^۲ و ته‌نشینی زیستی^۳ است [۷]. در فرآیند جذب بیولوژیکی، توانایی زیست توده‌ی میکروبی (غیر فعال، زنده و مرده) در اتصال به فلزات سنگین یا آلاینده‌های موجود در محلول رقیق تعریف می‌شود [۸]. در کنار روش‌های موجود،

5. Microprecipitation
6. Macroalgae
7. Microalgae

1. Biosorption
2. Bioaccumulation
3. Bioprecipitation
4. S-layer protein (SLP)

برای تهیه محلول‌های سرب با غلظت‌های مورد نیاز با استفاده از نیترات سرب، ابتدا مقدار سرب را طبق رابطه استوکیومتری ۱ محاسبه کرده و پس از توزین این مقدار، آن را در بالن ژوژه یک لیتری ریخته و با اضافه کردن آب مقطر تا خط نشانه به حجم رسانده شد. سپس محلول تهیه شده در ارلن‌های ۱ لیتری منتقل شده و دهانه ارلن جهت بستن مسیر گردش هوا و تبخیر، با فویل بسته شد.

$$A \text{ mg Pb} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ mol Pb}}{207.2 \text{ g Pb}} \times \frac{1 \text{ mol PbNO}_3}{1 \text{ mol Pb}} \times \frac{331 \text{ g PbNO}_3}{1 \text{ mol PbNO}_3} = B \text{ g PbNO}_3$$

معادله ۱

که در آن A غلظت مورد نیاز سرب در محلول نهایی و B مقدار مورد نیاز از نیترات سرب برای تهیه محلولی با غلظت مذکور است.

۳- کشت اولیه‌ی جلبک و بررسی بهینه‌ی رشد

استوک اولیه ریزجلبک اسپیرولینا پلاتنسیس در شرایط استاندارد در محیط کشت زاروک کشت داده شد. بدین منظور، ابتدا ارلن‌های ۵۰۰ میلی‌لیتری در اتوکلاو در فشار ۱،۵ اتمسفر و دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه استریل شده و بعد از خنک شدن، سه نمونه کشت به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر تحت دمای ثابت ۲۶ درجه سانتی‌گراد، شدت هوادهی ۱۰۰ سی‌سی بر دقیقه، تحت شرایط نور ۱۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۴۵۰۰ لوکس و پی‌اچ ۹، ۱۰ و ۱۱ گذاشته شد. هدف از این مرحله بررسی شرایط بهینه‌ی رشد جلبک جهت ادامه‌ی تست‌هاست. در این مرحله ۱۰ درصد استوک که در فاز لگاریتمی قرار دارد به ۹۰ درصد محیط کشت زاروک افزوده شده و به منظور جلوگیری از ورود هرگونه آلودگی خارجی به کشت، تمامی مراحل زیر هود بیولوژیکی انجام شد. کشت‌ها برای ادامه‌ی رشد جعبه نور قرار داده شد و تحت هوادهی قرار گرفت.

۴- جذب بیولوژیکی فلز سنگین سرب

پس از مشخص شدن شرایط بهینه، تست‌های نهایی انجام شد. با توجه به طراحی آزمایش صورت گرفته، سه پارامتر غلظت جلبک (۰،۵، ۱، ۱،۵ و ۲ گرم بر لیتر)، غلظت سرب (۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر) و زمان تماس (۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ دقیقه) به عنوان پارامترهای آزمایش نهایی در نظر گرفته شد.

به منظور انجام این تست‌ها ۱۲ نمونه کشت گذاشته شد. با بررسی میزان رشد بر اساس اسپکتروفوتومتر بعد از رسیدن گروه اول کشت‌ها به غلظت ۰،۵ گرم بر لیتر سه غلظت سرب به سه نمونه اضافه شده و پس از مدت زمان‌های معین از کشت نمونه برداری شده و میزان جذب اندازه‌گیری شد. این روند برای غلظت‌های ۱، ۱،۵ و ۲ گرم بر

دیواره جلبک‌ها از سه قسمت غشاء پلاسمایی، دیواره سلولی و غشاء خارجی تشکیل شده است. غشاء خارجی گونه‌های مختلف جلبک‌ها با هم فرق می‌کند و می‌تواند از سلولز، اسید آلژینیک، فوکویدان و پلی ساکاریدهای سولفات تشکیل شده باشد. مقدار بازده آنها به ظرفیت، میزان پیوند بین مولکول‌ها و ویژگی‌های شیمیایی - فیزیکی طبیعی آنها بستگی دارد [۱۴]. اسپیرولینا نوعی ریز جلبک سبز آبی مارپیچی از نوع سیانوباکتری‌ها بوده و شامل دو زیرگونه‌ی اصلی *plantensis* و *maxima* می‌باشد. این جلبک در آب‌های شیرین مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری که دارای محیط قلیایی باشند رشد می‌کند. این ریز جلبک دارای خواص آنتی‌اکسیدانی بوده و محتوای پروتئینی بالایی دارد. علاوه بر این اسپیرولینا غنی از ویتامین، مواد معدنی، اسیدهای چرب ضروری و کاروتنوئید است [۱۵]. ریزجلبک اسپیرولینا به دلیل شرایط کشت و رشد آسان و راندمان بالای تولید در کنار خواص پروتئینی و آنتی‌اکسیدانی آن در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

سنجش میزان حذف سرب از محیط‌های آلوده آبی توسط ریزجلبک اسپیرولینا در سطح آزمایشگاهی از اهداف این تحقیق است. راندمان جذب فلزات سنگین با ریزجلبک‌ها وابسته به شرایط مختلف است که متناسب با نوع فلز سنگین و شرایط مناسب جذب آلاینده باید تعیین و سیستم حذف آلاینده بهینه‌سازی گردد. در پروژه‌ی حاضر شرایط بهینه‌ی رشد، غلظت یون فلزی، مدت زمان تماس و مقدار ریزجلبک مورد استفاده در سرعت جذب و توانایی مطلوب حذف یون‌های فلزی مورد بررسی قرار گرفت.

روش پژوهش

۱- تجهیزات و مواد مورد استفاده

در مطالعه‌ی حاضر استوک ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس از مجموعه‌ی بانک ملی جلبک ایران (INACC) تهیه شد و کشت در محیط زاروک انجام شد [۱۶]. نمک نیترات سرب (PbNO_3) گرید آنالیتیکال از شرکت سیگما تهیه شد. تجهیزات مورد نیاز در مطالعه حاضر شامل ترازو آزمایشگاهی (مدل PTX-FA210، شرکت AND)، pH متر (Hanna HI207)، سانتریفوژ (Sigma 101-13851)، اسپکتروفوتومتر (Unico, UV-2100 Spectrophotometer)، طیف‌سنج جذب اتمی (Varia Spectra AA 220FS)، شیکر/انکوباتور (شرکت فن آزما گستر، مدل KM C 65 - شرکت جال تجهیز)، اتوکلاو (شرکت تجهیزات پزشکی کاووش مگا، مدل AV ۷۵)، دماسنج الکترونیکی (Cheerman - KT300) و لوکس متر (Lutron - LX-1108) بود.

۲- تهیه محلول سرب

۶- مدل ایزوترم جذب لانگمویر

ایزوترم جذب برای تعیین ظرفیت تئوریک جذب یک آلاینده مشخص به کار می‌رود. معادله لانگمویر (Langmuir) یکی از قوانین معتبر جذب فیزیکی به وسیله بیومس‌های غیرزنده است که در بسیاری از موارد صادق می‌باشد و برای جذب تک لایه‌ای روی سطوح با تعداد محدودی از موقعیت‌های جذب یکسان، به کار می‌رود [۱۷].

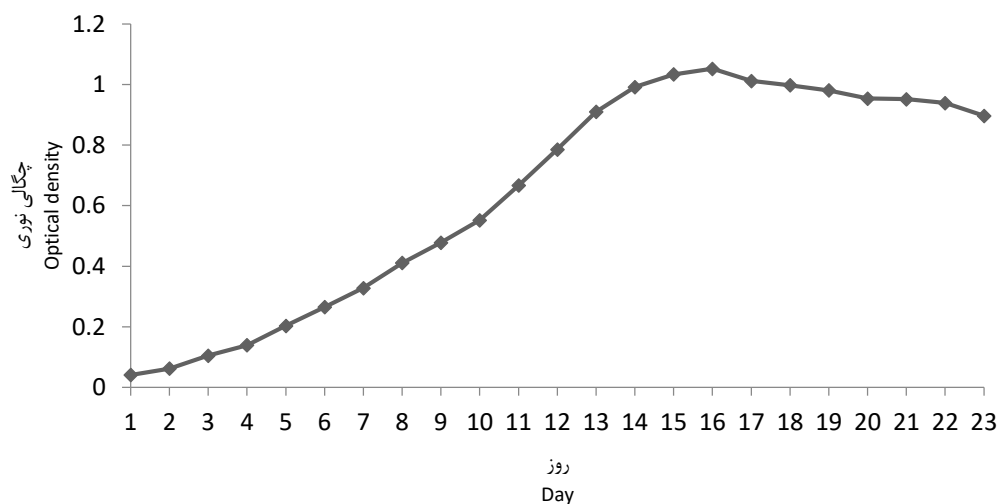
لیتر جلبک نیز تکرار شد. هر کدام از تست‌ها سه مرتبه تکرار شده و میانگین نتایج گزارش شد. سنجش میزان جذب توسط دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (AAS) انجام شد.

برای محاسبه‌ی غلظت فلز سنگین با استفاده از طیف سنج جذب اتمی از منحنی کالیبراسیون فلز سرب در ۵ غلظت در محدوده‌ی ۵ تا ۵۰ پی‌پی‌ام استفاده شد

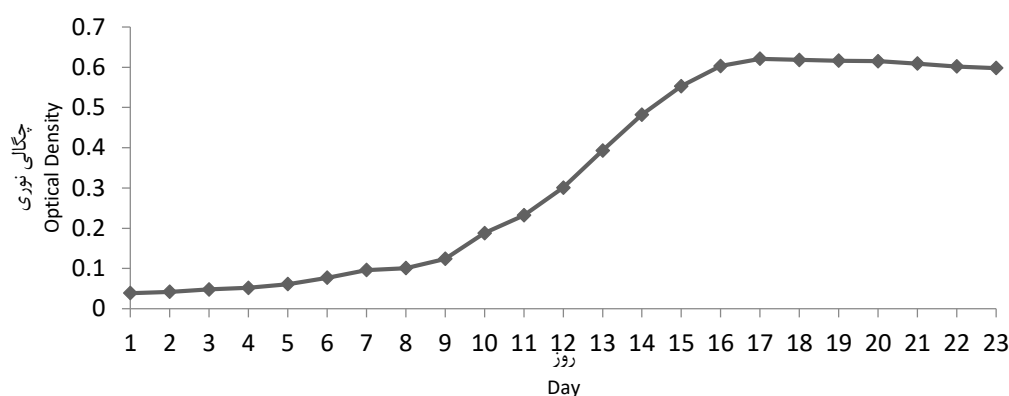
نتایج و بحث

۱- بررسی شرایط بهینه‌ی رشد

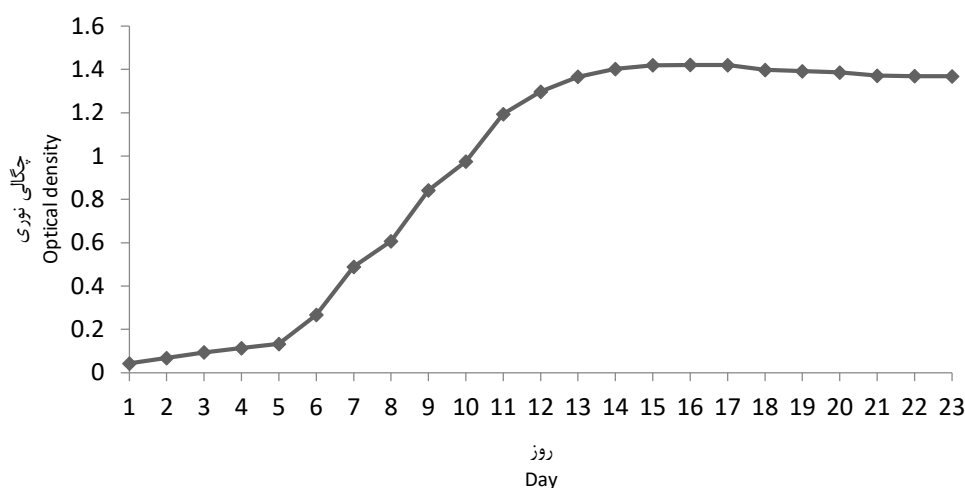
برای بررسی بهینه‌ی رشد سه کشت تحت شرایط مشخص گذاشته شده و میزان رشد روزانه‌ی آن‌ها توسط دستگاه اسپکتروفوتومتری اندازه‌گیری شد. نمودارهای رشد هر سه کشت در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ آورده شده است.



شکل ۱. نمودار رشد ریزجلبک/سپیرولینا بر اساس چگالی نوری تحت نور ۱۵۰۰ و پی‌اچ ۹



شکل ۲. نمودار رشد ریزجلبک اسپیرولینا بر اساس چگالی نوری تحت نور ۴۵۰۰ و پی اچ ۱۱



شکل ۳. نمودار رشد ریزجلبک اسپیرولینا بر اساس چگالی نوری تحت نور ۳۰۰۰ و پی اچ ۱۰

۲- جذب بیولوژیکی

جهت بررسی جذب بیولوژیکی فلز سرب توسط ریزجلبک اسپیرولینا پلاتنسیس، ۱۲ کشت به صورت هم‌زمان گذاشته شده و با بررسی هر روزه‌ی میزان رشد، پس از رسیدن سه نمونه‌ی اول به غلظت ۰٫۵ گرم بر لیتر، سه غلظت مشخص سرب به طور جداگانه به سه نمونه اضافه شده و در زمان‌های مشخص با نمونه برداری از محلول میزان جذب فلز سنگین بررسی شد. این روند برای سایر کشت‌ها در شرایط ۱، ۱٫۵ و ۲ گرم بر لیتر نیز انجام شده و پس از ۳ بار تکرار آزمایشات نتایج آن در جداول ۱، ۲، ۳ و ۴ آورده شده است.

بررسی شرایط رشد نشان داد که بهینه‌ی رشد در شرایط نور ۳۰۰۰ لوکس و پی اچ ۱۰ رخ داده و ماکزیمم چگالی نوری رشد در این شرایط ۱٫۴۲۱ بود که غلظتی در حدود ۰٫۵ گرم بر لیتر را در شرایط بهینه‌ی رشد خود دارد. بررسی رشد ریزجلبک اسپیرولینا نشان داد که جلبک در روزهای ۱۶ ام و ۱۷ ام به حداکثر رشد خود رسیده و وارد فاز ثابت شد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که با توجه به کشت اولیه از استوک میزان رشد در کشت ابتدایی پایین بوده و در کشت‌های بعدی این میزان افزایش داشت و تا غلظت ۲ گرم بر لیتر رسید.

جدول ۱. جذب بیولوژیکی فلز سرب توسط اسپیرولینا با غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر

غلظت سرب (میلی گرم بر لیتر) (Lead Concentration (mg/L))	زمان تماس (دقیقه) (Contact time (min))	درصد حذف			میانگین (average)	انحراف معیار (stdev)
		(Uptake %)				
۲۰	۳۰	۵۵/۳۲	۵۰/۹۱	۵۰/۶۳	۵۲/۲۹	۲/۶۳
	۶۰	۷۱/۱۷	۶۸/۵۳	۶۷/۵۳	۶۹/۰۷	۱/۸۸
	۹۰	۷۲/۷۴	۷۰/۳۳	۶۷/۶۷	۷۰/۲۴	۲/۵۴
	۱۸۰	۷۱/۷۴	۶۸/۰۰	۶۸/۵۱	۶۹/۴۲	۲/۰۳
	۳۶۰	۶۵/۶۲	۶۰/۲۱	۶۳/۳۵	۶۳/۰۶	۲/۷۲
۴۰	۳۰	۴۸/۸۰	۴۳/۹۴	۴۴/۰۷	۴۵/۶۰	۲/۷۷
	۶۰	۵۹/۰۴	۵۵/۹۱	۵۵/۵۹	۵۶/۸۵	۱/۹۱
	۹۰	۶۱/۶۵	۵۷/۲۷	۵۶/۹۳	۵۸/۶۲	۲/۶۳
	۱۸۰	۶۱/۴۲	۵۷/۵۴	۵۶/۳۱	۵۸/۴۲	۲/۶۷
	۳۶۰	۵۵/۵۶	۵۱/۶۳	۵۰/۹۶	۵۲/۷۲	۲/۴۸
۶۰	۳۰	۴۱/۳۱	۳۷/۴۷	۳۷/۹۱	۳۸/۹۰	۲/۱۰
	۶۰	۴۵/۰۸	۴۰/۶۷	۴۲/۹۵	۴۲/۹۰	۲/۲۰
	۹۰	۴۲/۵۸	۴۶/۶۷	۴۷/۶۱	۴۵/۶۲	۲/۶۸
	۱۸۰	۴۷/۰۶	۴۵/۲۹	۴۳/۴۰	۴۵/۲۵	۱/۸۳
	۳۶۰	۳۷/۴۰	۳۳/۷۴	۳۶/۱۳	۳۵/۷۶	۱/۸۶

جدول ۲. جذب بیولوژیکی فلز سرب توسط اسپیرولینا با غلظت ۱ گرم بر لیتر

غلظت سرب (میلی گرم بر لیتر) (Lead Concentration (mg/L))	زمان تماس (دقیقه) (Contact time (min))	درصد حذف			میانگین (average)	انحراف معیار (stdev)
		(Uptake %)				
۲۰	۳۰	۵۳/۸۰	۵۱/۹۵	۵۴/۹۱	۵۳/۵۵	۱/۴۹
	۶۰	۶۸/۹۲	۶۳/۰۹	۷۴/۳۹	۶۸/۸۰	۵/۶۵
	۹۰	۷۱/۰۹	۶۵/۵۴	۷۷/۳۱	۷۱/۳۱	۵/۸۹
	۱۸۰	۷۴/۲۶	۷۴/۸۳	۷۹/۸۲	۷۶/۳۰	۳/۰۶
	۳۶۰	۶۸/۰۱	۷۴/۵۰	۶۸/۱۳	۷۰/۲۱	۳/۷۱
۴۰	۳۰	۴۸/۸۲	۵۲/۳۵	۴۸/۰۷	۴۹/۷۵	۲/۲۸
	۶۰	۵۴/۹۴	۵۴/۴۲	۵۰/۷۰	۵۴/۰۲	۲/۹۷
	۹۰	۵۹/۴۸	۵۲/۹۲	۵۵/۷۸	۵۶/۳۹	۲/۸۳
	۱۸۰	۶۰/۰۶	۶۵/۲۲	۵۸/۶۰	۶۱/۳۹	۳/۴۸
	۳۶۰	۵۳/۰۴	۵۱/۱۰	۵۱/۱۴	۵۱/۷۶	۱/۱۱
۶۰	۳۰	۳۹/۸۳	۳۹/۲۷	۴۱/۳۶	۴۰/۱۵	۱/۰۸
	۶۰	۴۲/۰۴	۴۴/۶۳	۴۲/۹۲	۴۳/۲۰	۱/۳۲
	۹۰	۴۷/۸۲	۴۵/۱۳	۴۶/۱۱	۴۶/۳۵	۱/۳۶
	۱۸۰	۴۶/۰۹	۴۳/۳۳	۴۳/۸۲	۴۴/۴۲	۱/۴۷
	۳۶۰	۳۶/۷۴	۳۷/۴۱	۳۷/۶۶	۳۷/۲۷	۰/۴۸

جدول ۳. جذب بیولوژیکی فلز سرب توسط اسپیرولینا با غلظت ۱/۵ گرم بر لیتر

غلظت سرب (میلی گرم بر لیتر) (Lead Concentration (mg/L))	زمان تماس (دقیقه) (Contact time (min))	درصد حذف (Uptake %)			میانگین (average)	انحراف معیار (stdev)
۲۰	۳۰	۵۵/۱۱	۵۶/۱۷	۵۷/۱۳	۵۶/۱۴	۱/۰۱
	۶۰	۷۰/۹۰	۷۴/۰۹	۷۴/۲۹	۷۳/۰۹	۱/۹۰
	۹۰	۷۳/۵۹	۷۴/۶۴	۷۹/۹۶	۷۵/۰۶	۱/۷۲
	۱۸۰	۷۷/۳۲	۸۱/۱۲	۷۹/۰۱	۷۹/۱۵	۱/۹۱
	۳۶۰	۷۱/۰۱	۷۴/۳۷	۷۳/۵۸	۷۲/۹۹	۱/۷۶
۴۰	۳۰	۴۹/۷۲	۵۱/۶۰	۵۰/۶۲	۵۰/۶۵	۰/۹۴
	۶۰	۵۶/۳۸	۵۸/۳۹	۵۸/۵۸	۵۷/۷۹	۱/۲۲
	۹۰	۶۲/۱۶	۶۴/۴۳	۶۳/۳۱	۶۳/۳۰	۱/۱۲
	۱۸۰	۶۱/۰۱	۶۲/۴۹	۶۱/۶۹	۶۱/۷۳	۰/۷۴
	۳۶۰	۵۵/۱۵	۵۷/۷۴	۵۶/۲۷	۵۶/۳۸	۱/۳۰
۶۰	۳۰	۴۱/۴۳	۴۰/۰۱	۴۲/۰۹	۴۱/۱۸	۱/۰۶
	۶۰	۴۵/۹۸	۴۴/۴۲	۴۶/۵۰	۴۵/۶۳	۱/۰۸
	۹۰	۵۰/۱۳	۵۲/۱۸	۵۱/۰۶	۵۱/۱۲	۱/۰۳
	۱۸۰	۴۸/۲۹	۵۰/۲۴	۴۹/۹۹	۴۹/۵۱	۱/۰۶
	۳۶۰	۳۷/۸۸	۳۹/۴۱	۳۹/۲۱	۳۸/۸۳	۰/۸۳

جدول ۴. جذب بیولوژیکی فلز سرب توسط اسپیرولینا با غلظت ۲ گرم بر لیتر

غلظت سرب (میلی گرم بر لیتر) (Lead Concentration (mg/L))	زمان تماس (دقیقه) (Contact time (min))	درصد حذف (Uptake %)			میانگین (average)	انحراف معیار (stdev)
۲۰	۳۰	۵۹/۴۸	۶۷/۳۴	۶۷/۱۸	۶۴/۶۷	۴/۴۹
	۶۰	۷۷/۵۵	۷۷/۷۵	۸۱/۵۴	۷۸/۹۵	۲/۲۵
	۹۰	۷۸/۰۴	۸۲/۸۲	۸۰/۲۸	۸۰/۳۸	۲/۳۹
	۱۸۰	۷۸/۹۱	۸۲/۵۲	۸۱/۵۶	۸۱/۳۳	۲/۳۲
	۳۶۰	۷۲/۲۷	۸۱/۱۹	۸۲/۱۸	۷۸/۵۵	۵/۴۶
۴۰	۳۰	۵۳/۷۷	۶۰/۴۵	۵۸/۳۹	۵۷/۵۳	۳/۴۲
	۶۰	۶۲/۹۱	۷۰/۰۳	۶۶/۰۹	۶۶/۳۴	۳/۵۷
	۹۰	۶۴/۰۸	۶۹/۱۸	۶۸/۹۳	۶۷/۴۰	۲/۸۷
	۱۸۰	۶۴/۷۴	۷۰/۵۳	۷۱/۲۱	۶۸/۸۳	۳/۵۶
	۳۶۰	۶۰/۴۹	۶۲/۹۶	۶۴/۳۱	۶۲/۹۲	۲/۱۱
۶۰	۳۰	۴۲/۷۴	۴۶/۰۰	۴۷/۹۸	۴۵/۵۷	۲/۶۴
	۶۰	۷۴/۶۹	۵۴/۰۵	۵۴/۶۵	۵۲/۱۳	۳/۸۶
	۹۰	۵۴/۴۷	۵۷/۴۱	۵۹/۷۴	۵۷/۲۱	۲/۶۴
	۱۸۰	۴۹/۷۲	۵۵/۴۲	۵۶/۶۹	۵۳/۹۴	۳/۷۱
	۳۶۰	۴۰/۴۱	۴۲/۴۴	۴۵/۸۸	۴۳/۲۵	۲/۷۴

با توجه به نمودارهای میزان جذب بیولوژیکی فلز سرب بر حسب زمان و فرم زنگوله‌ای نمودارهای جذب و با توجه به این نکته که با افزایش غلظت ریزجلبک، ظرفیت جذب افزایش می‌یابد، با استفاده از نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر و معادله لانگمویر، ثابت‌های حاصل از تطبیق داده‌های تجربی بر ایزوترم تعادلی، R_2 (ضریب همبستگی) برابر با ۰,۹۷ و ضریب b ، برابر با ۰,۱۶۱ لیتر بر میلی‌گرم به دست آمد. پارامترهای ایزوترم لانگمویر برای جذب سرب توسط ریزجلبک اسپیرولینا پلاتنسیس در جدول ۵ و ۶ قابل مشاهده است.

جدول ۵. پارامترهای ایزوترم لانگمویر برای جذب سرب توسط

اسپیرولینا

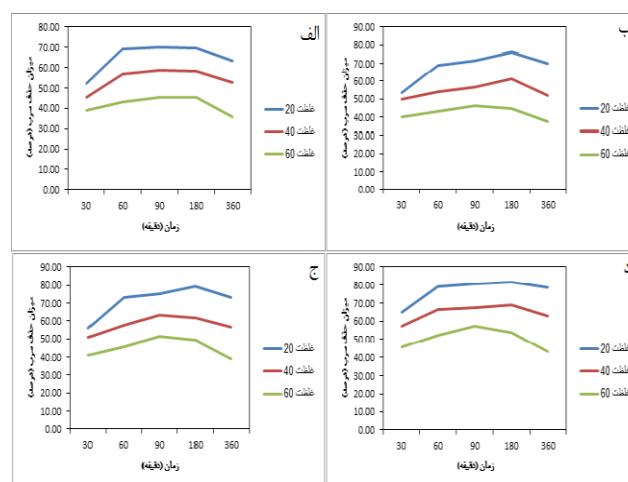
پارامترها (parameters)	
۲۳/۰۹	$q_m(\text{mg/g})$
۰/۱۶۱	$b(\text{L/mg})$
۰/۹۷	R^2

جدول ۶. مقادیر تعادلی جذب سرب توسط اسپیرولینا

C_e	C_e/q_e
۰/۰۱	۰/۰۱
۲۰	۰/۶۹
۴۰	۱/۰۷
۶۰	۱/۳۳

با اعداد به دست آمده، نمودار ایزوترم لانگمویر برای جذب سرب بر طبق رابطه لانگمویر محاسبه و شکل ۵ به دست آمد. نتایج نشان می‌دهند که ایزوترم لانگمویر برای فلز سرب، به خوبی می‌تواند داده‌های آزمایشی را برازش کند.

بررسی نتایج بیانگر این بود که غلظت‌های بالاتر جلبک میزان جذب بیولوژیکی بالاتری داشته و ماکزیمم راندمان جذب در غلظت ۲ گرم بر لیتر اسپیرولینا به دست آمده است. بررسی میزان آلاینده‌ی سرب نیز بیانگر تأثیر منفی افزایش غلظت بوده و غلظت‌های بالاتر سرب به دلیل اثر سمیت بر سلول‌های جلبک باعث کاهش جذب بیولوژیکی شد. بررسی اثر زمان تماس نشان داد که با افزایش زمان تماس میزان جذب بیولوژیکی افزایش یافته و از حدود ۱۸۰ دقیقه به بعد این میزان کاهش می‌یابد که احتمالاً به دلیل اثر سمیت فلز سنگین باقیمانده بر سلول‌های ریزجلبک اسپیرولینا است (شکل ۴).



شکل ۴. بررسی اثر زمان تماس بر میزان حذف سرب در الف) غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر اسپیرولینا. ب) غلظت ۱ گرم بر لیتر اسپیرولینا. ج) غلظت ۱/۵ گرم بر لیتر اسپیرولینا. د) غلظت ۲ گرم بر لیتر اسپیرولینا.

نتایج حاصل نشان داد حداکثر حذف فلز سنگین سرب در غلظت ۲ گرم بر لیتر اسپیرولینا و دوز سرب ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر در مدت زمان تماس ۱۸۰ دقیقه به میزان ۸۱,۳۳ درصد بوده است. همچنین با وجود میزان بالاتر جذب در ۱۸۰ دقیقه، با توجه به اختلاف کم میزان حذف در زمان‌های ۹۰ دقیقه و ۱۸۰ دقیقه و کاهش میزان حذف در زمان‌های بالاتر از ۱۸۰ دقیقه، به نظر می‌رسد زمان تماس ۹۰ دقیقه بهینه‌ترین زمان تماس جهت حذف زیستی فلز سنگین سرب با استفاده از ریزجلبک اسپیرولینا است.

۳- مدل سازی جذب بیولوژیکی سرب

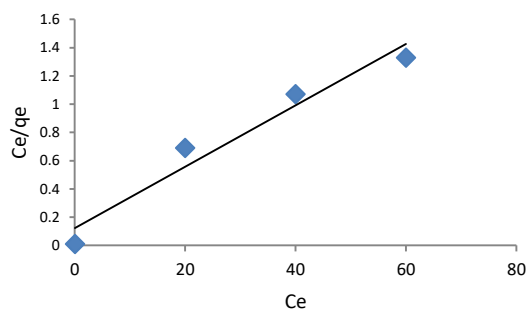
ایزوترم جذب مورد مطالعه در این بررسی، ایزوترم لانگمویر است. در مدل ارائه شده با بررسی رابطه بین میزان جذب و غلظت برازش نتایج با مدل لانگمویر بررسی شد که برای بهینه‌سازی و طراحی کارآمد و مفیدتر سیستم جداسازی - بازیافت لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

شیمیایی ادامه یافته که در واقع نوعی فرایند تعویض یونی است. در مطالعه‌ی حاضر نیز این روند جذب کاملاً مشهود بود [۱۹].

غلظت اولیه‌ی فلز سنگین در محلول‌های آبی مستقیماً بر سرعت جذب جاذب‌های زیستی تأثیر می‌گذارد. افزایش غلظت باعث ایجاد رقابت بین یون‌های فلزی برای اتصال روی سطح دیواره‌ی سلولی می‌شود. با توجه به اینکه در ابتدا سایت‌های فعال جاذب خالی بوده و گرادیان غلظت املاح بالاست در مرحله جذب سریع جاذبه‌ی یونی باعث پر شدن سطوح فعال جلبک از یون‌های فلزی شده و با کاهش سطوح فعال غلظت‌های بالاتر سرب توانایی اتصال به ریزجلبک و جذب توسط آن را ندارند [۲۰]. حذف فلزات سنگین توسط ریزجلبک‌ها شامل ۲ مرحله است [۲۱ و ۲۲]. مرحله اول جذب بیولوژیکی ۸ است که خیلی سریع و به صورت فیزیکی یا شیمیایی اتفاق می‌افتد. این جذب بیولوژیکی می‌تواند هم در سلول‌های مرده و هم در سلول‌های زنده رخ دهد [۲۳]. مرحله دوم شامل جذب شیمیایی ۹ است که فرآیندی آهسته بوده و در طول رشد جلبک و تنها در سلول‌های زنده رخ می‌دهد [۸]. از طرفی برخی پژوهش‌ها عنوان می‌کنند که مقدار فلز جذب شده به ازای واحد جرم توده زنده زمانی افزایش می‌یابد که غلظت اولیه یون‌های فلزی در محلول زیاد شود که ممکن است در نتیجه اشباع مکان‌های فعال توده زنده باشد و منجر به حداکثر ظرفیت جذب یون‌های فلزی توسط توده زنده گردد [۲۴].

مطالعات پیشین نشان می‌دهند مدل نمودار جذب اکثر جلبک‌ها از ایزوترم لانگمویر تبعیت کرده که نشان می‌دهد جذب به وسیله مکان‌های همگن مخصوص که درون ساختار جاذب وجود دارد صورت می‌گیرد و هریک از این مکان‌ها تنها قابلیت جذب یک ردیف مولکول را داشته و در صورت ورود مولکول دیگر هیچ گونه تغییری در آن مکان که قبلاً عمل جذب صورت گرفته رخ نمی‌دهد و می‌توان گفت فرآیند جذب به صورت تک لایه انجام می‌شود [۲۵].

به طور کلی نتایج نشان داد که ریزجلبک اسپیرولینا در ۹۰ دقیقه‌ی ابتدایی برخورد با فلز سنگین راندمان جذب بالایی (بیش از ۸۰ درصد) داشته ولی با توجه به اثر سمیت فلز سنگین بهتر است اسپیرولینا تا غلظت ۲ گرم بر لیتر رشد کرده و سپس در معرض فلز سنگین قرار داده شود. همچنین زیست توده‌ی زنده با توجه به اثر سمیت فلز سنگین نمی‌تواند غلظت‌های بالای سرب را تحمل کرده و راندمان بالایی داشته باشد لذا بهینه‌ی غلظت سرب در این پژوهش ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش می‌شود. همچنین پیشنهاد می‌شود جذب فیزیکی زیست توده‌ی غیر فعال اسپیرولینا و همچنین سایر زیرگونه‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۵. نمودار ایزوترم لانگمویر برای جذب سرب توسط اسپیرولینا

نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر جذب بیولوژیکی فلز سنگین سرب توسط ریزجلبک اسپیرولینا پلاتنسیس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد غلظت ریز جلبک بر میزان حذف فلز سنگین تأثیر مستقیم داشته و با افزایش آن میزان حذف فلز سرب افزایش می‌یابد. همچنین افزایش زمان تماس تا ۱۸۰ دقیقه موجب افزایش راندمان جذب بیولوژیکی شده و پس از آن به دلیل اثر سمیت سلولی میزان حذف فلز سنگین کاهش می‌یابد. همچنین نتایج بیانگر این است که ایزوترم لانگمویر توانست بهتر از سایر مدل‌ها، داده‌های آزمایشی را برازش کند. مقدار R2 (ضریب همبستگی) مربوط به معادله لانگمویر برای جذب فلز سرب، ۰,۹۷ به دست آمد.

فرایند جذب بیولوژیکی توسط اسپیرولینا شامل دو مرحله‌ی سریع جذب (۲۰ دقیقه اول) و جذب آهسته در ادامه آن است [۱۸]. بر اساس نتایج مطالعه‌ی حاضر راندمان جذب تا حدود دقیقه‌ی ۶۰ صعودی بوده و پس از آن به تدریج از شیب آن کاسته می‌شود. همچنین میزان جذب بالا در ۳۰ دقیقه‌ی اول (بیش از ۵۰ درصد جذب بیولوژیکی کل در همه‌ی نمونه‌ها) نشان‌دهنده‌ی وجود یک مرحله جذب سریع در دقایق اولیه است. وجود گروه‌های فعال عاملی کربوکسیل، هیدروکسیل و سولفات باعث می‌شود در دقایق ابتدایی برخورد ریزجلبک و فلز سنگین، سایت‌های فعال ریزجلبک توسط فلز اشباع شوند و به تدریج با پر شدن سایت‌های فعال میزان جذب کاهش می‌یابد [۱۹]. دلیل جذب سریع در ۳۰ دقیقه‌ی اول مطالعه‌ی حاضر به دلیل جذب فیزیکی سریع در سایت‌های فعال سلول جلبک بوده که به سایت‌های منفی مشهور است و جذب با نیروی الکترواستاتیکی رخ می‌دهد. در مرحله‌ی دوم جذب با ایجاد کمپلکس

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از تمام کسانی که به نحوی در انجام این مطالعه نقش ایفا نموده اند تقدیر و تشکر می نمایند.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافی برای این مطالعه وجود ندارد.

منابع

- [9] Volesky B. Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy*. 2001 Feb 1;59(2-3):203-16.
- [10] Gerbino E, Carasi P, Araujo-Andrade C, Tymczyszyn EE, Gómez-Zavaglia A. Role of S-layer proteins in the biosorption capacity of lead by *Lactobacillus kefir*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2015 Apr;31(4):583-92.
- [11] Gherasim CV, Křivčík J, Mikulášek P. Investigation of batch electrodialysis process for removal of lead ions from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*. 2014 Nov 15;256:324-34.
- [12] Barkhordari Ahmadi Z, Taherizadeh M R, Yousef Zadi M. Effects of different concentrations of lead on growth, photosynthetic pigmentation and Protein Micro alga *Isochrysis galbana*. *joc*. 2021; 12 (46) :109-117 (Persian).
- [13] Orona-Navar A, Aguilar-Hernández I, Nigam KD, Cerdán-Pasarán A, Ornelas-Soto N. Alternative sources of natural pigments for dye-sensitized solar cells: Algae, cyanobacteria, bacteria, archaea and fungi. *Journal of Biotechnology*. 2021 May 20;332:29-53.
- [14] Srivastava NK, Majumder CB. Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. *Journal of hazardous materials*. 2008 Feb 28;151(1):1-8.
- [15] Williams PJ, Laurens LM. Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics. *Energy & environmental science*. 2010;3(5):554-90.
- [16] Radmann EM, Reinehr CO, Costa JA. Optimization of the repeated batch cultivation of microalga *Spirulina platensis* in open raceway ponds. *Aquaculture*. 2007 May 1;265(1-4):118-26.
- [17] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical society*. 1918 Sep;40(9):1361-403.
- [18] Davis TA, Volesky B, Mucci A. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water research*. 2003 Nov 1;37(18):4311-30.
- [1] Saligheh Zadeh R, Yavari V, Mousavi S M, Zakeri M. Effect of Different Levels of Dietary Supplementation of *Spirulina platensis* on Some Growth, Feeding Indices and Body Composition of Benny Mesopotamichthys sharpeyi (Günther, 1874) Fingerlings. *joc*. 2014; 5 (18) :21-27 (Persian).
- [2] Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of environmental management*. 2011 Mar 1;92(3):407-18.
- [3] Azimi A, Azari A, Rezakazemi M, Ansarpour M. Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review. *ChemBioEng Reviews*. 2017 Feb;4(1):37-59.
- [4] Chojnacka K, Chojnacki A, Gorecka H. Biosorption of Cr³⁺, Cd²⁺ and Cu²⁺ ions by blue-green algae *Spirulina sp.*: kinetics, equilibrium and the mechanism of the process. *Chemosphere*. 2005 Mar 1;59(1):75-84.
- [5] Al-Homaidan AA, Al-Abbad AF, Al-Hazzani AA, Al-Ghanayem AA, Alabdullatif JA. Lead removal by *Spirulina platensis* biomass. *International journal of phytoremediation*. 2016 Feb 1;18(2):184-9.
- [6] Chaumont D. Biotechnology of algal biomass production: a review of systems for outdoor mass culture. *Journal of applied phycology*. 1993 Dec;5(6):593-604.
- [7] Zabihi M, Ahmadpour A, Asl AH. Removal of mercury from water by carbonaceous sorbents derived from walnut shell. *Journal of Hazardous materials*. 2009 Aug 15;167(1-3):230-6.
- [8] Wilde EW, Benemann JR. Bioremoval of heavy metals by the use of microalgae. *Biotechnology advances*. 1993 Jan 1;11(4):781-812.

Journal of Environmental Science & Health Part A. 1993 Jan 1;28(1):37-50.

[23] Khummongkol D, Canterford GS, Fryer C. Accumulation of heavy metals in unicellular algae. *Biotechnology and Bioengineering*. 1982 Dec;24(12):2643-60.

[24] Baldrian P. Interactions of heavy metals with white-rot fungi. *Enzyme and Microbial technology*. 2003 Jan 2;32(1):78-91.

[25] Zhou GJ, Peng FQ, Zhang LJ, Ying GG. Biosorption of zinc and copper from aqueous solutions by two freshwater green microalgae *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus*. *Environmental Science and Pollution Research*. 2012 Aug;19(7):2918-29.

[19] Li ZY, Guo SY, Li L. Study on the process, thermodynamical isotherm and mechanism of Cr (III) uptake by *Spirulina platensis*. *Journal of Food Engineering*. 2006 Jul 1;75(1):129-36.

[20] Kaya Y, Aksakal Ö, Uzun H. Biosorption of lead (ii) and zinc (ii) from aqueous solutions by *Nordmann fir (Abies nordmanniana (Stev.) Spach. subsp. nordmanniana) cones*. *Acta Chim. Slov.* 2009 Jan 1;56:451-6.

[21] Özer D, Aksu Z, Kutsal T, Çağlar A. Adsorption isotherms of lead (II) and chromium (VI) on *Cladophora crispata*. *Environmental technology*. 1994 May 1;15(5):439-48.

[22] Roy D, Greenlaw PN, Shane BS. Adsorption of heavy metals by green algae and ground rice hulls.

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

Izadi, sh., MSc Marin Biotechnology, Faculty of Marine Science and Technology, Islamic Azad University Tehran North Branch, Tehran, Iran



Sadeghi, M., Assistant Professor, Faculty of Marine Science and Technology, Islamic Azad University Tehran North Branch, Tehran, Iran



m_sadeghi@iau-tnb.ac.ir

0000-0002-2177-0624

این قسمت توسط نشریه تکمیل می‌گردد:

HOW TO CITE THIS ARTICLE



Dor:20.1001.1.15621057.1401.13.52.4.9

<http://doi.org/10.52547/joc.13.51.4>

<http://joc.inio.ac.ir/article-1-1721-fa.html>

<https://orcid.org/0000-0002-2177-0624>

COPYRIGHTS



©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.