

Research Paper

مقاله پژوهشی

Biosorption of Nickel Heavy Metal from Aqueous Solutions Using Microalgae *Chaetoceros sp.*

جذب زیستی فلز سنگین نیکل توسط ریز جلبک *Chaetoceros sp.* از محلول‌های آبی

Nastaran Hajili¹, Mahnaz Sadat Sadeghi^{2*} and Farnaz Rafiei²

نسترن حاجیلی^۱، مهناز سادات صادقی^{۲*} و فرناز رفیعی^۲

1- M.Sc., Faculty of Marine Science and Technology, Department Marine Biology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

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

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

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

* Corresponding Author, Email: m_sadeghi@iau-tnb.ac.ir

* نویسنده مسئول، ایمیل: m_sadeghi@iau-tnb.ac.ir

Received: 26/12/2023

Revised: 05/06/2024

Accepted: 19/06/2024

© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

The aim of the present research was to utilize *Chaetoceros sp.* for the removal of nickel from water bodies and to analyze the impact of various factors on the biosorption of nickel. The study also examined the adsorption isotherm. In a two-phase experiment, different growth conditions were tested to determine the optimal conditions for *Chaetoceros sp.* growth, including temperature, light intensity, and light/dark cycle. Once the optimal growth conditions were identified, the algae's ability to absorb nickel was evaluated in the second phase. Factors such as temperature, contact time, and nickel concentration were found to influence the removal of nickel by *Chaetoceros sp.* Results indicated that under specific conditions -a temperature of 30 C°, light intensity of 600 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$, and a 12-hour light/12-hour dark cycle- *Chaetoceros sp.* exhibited the highest growth efficiency, reaching a maximum concentration of 2.06 g/L. The highest absorption efficiency for nickel was 26.21%, achieved at a temperature of 30 C°, a contact time of 24 hours, and a nickel concentration of 20 mg/L. Examining the absorption isotherm showed that the maximum nickel absorption capacity by *Chaetoceros* microalgae was 8.99 mg/g. Overall, the study revealed that increasing the temperature up to 30 C° enhanced the biosorption of nickel, while further temperature increases had a negative impact on the absorption process.

هدف مطالعه حاضر استفاده از جلبک *Chaetoceros sp.* برای حذف فلز سنگین نیکل از محیط آبی و بررسی اثر پارامترهای موثر بر جذب فلز نیکل با استفاده از این جلبک بود. هم‌چنین ایزوترم جذب مورد بررسی قرار گرفت. در یک آزمایش دو مرحله‌ای برای بررسی شرایط بهینه‌ی رشد، جلبک تحت شرایط متفاوت دما، شدت نور و چرخه تاریکی/روشنایی کشت داده شد. پس از مشخص شدن شرایط بهینه رشد، در مرحله دوم توانایی جلبک به‌عنوان جاذب نیکل بررسی شد. عوامل تاثیرگذار بر حذف نیکل از محیط آبی توسط جلبک *Chaetoceros* شامل دما، زمان تماس و غلظت نیکل بود. نتایج نشان داد که در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، شدت تابش نور $600 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ و چرخه نوری ۱۲ ساعت نور ۱۲ ساعت تاریکی، جلبک *Chaetoceros* بالاترین راندمان رشد را داشته و به حداکثر غلظت ۲/۰۶ گرم بر لیتر رسید. حداکثر راندمان جذب نیکل در مطالعه حاضر ۲۶/۲۱ درصد بود که در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، زمان تماس ۲۴ ساعت و غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر نیکل حاصل شد. بررسی ایزوترم جذب بیانگر این بود که حداکثر ظرفیت جذب نیکل توسط ریز جلبک *Chaetoceros* ۸/۹۹ میلی‌گرم بر گرم بود. نتایج نشان داد که به‌طور کلی با افزایش دما تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، میزان جذب زیستی نیکل توسط جلبک *Chaetoceros* افزایش یافته و پس از آن افزایش دما تاثیر معکوس بر روند جذب داشت.

Keywords: Algae, Biosorption, Diatom, Environmental pollutions, Heavy metals, Nickel.

کلمات کلیدی: آلودگی محیط‌زیستی، جذب زیستی، جلبک، دیاتومه، فلزات سنگین، نیکل

روش‌های مورد توجه در دهه‌های اخیر به‌شمار می‌رود. به این منظور استفاده از جاذب‌ها مورد توجه قرار گرفته است. جاذب‌ها به دودسته جاذب‌های طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. جاذب‌های طبیعی قادرند به‌صورت جذب شیمیایی و جذب سطحی آلاینده‌ها را جذب و از محیط خارج کنند. منابع متعدد تحقیقی، مکانیسم جذب درونی جاذب‌های طبیعی مختلف از جمله گیاهان و جلبک‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند (Fu and Wang, 2011).

روش‌های متعددی برای حذف فلزات سنگین از محیط‌های آبی وجود دارد. تبادل یونی و رسوب گذاری نمک فلزات سنگین از جمله روش‌های نسبتاً قدیمی برای حذف فلزات سنگین بوده ولی به دلیل راندمان پایین و هزینه عملیاتی بالا استفاده از آن رو به کاهش است (Incharoensakdi and Kitjahren, 2002). جذب فلزات سنگین با پایداری بالا در محیط یکی از روش‌های مورد توجه در سال‌های اخیر به‌شمار می‌رود. به این منظور استفاده از جاذب‌ها مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از روش‌های زیستی در حذف فلزات از پساب‌ها می‌تواند برخی از محدودیت‌ها و مشکلات مربوط به روش‌های فیزیکی و شیمیایی را برطرف نماید پتانسیل استفاده به‌عنوان یک روش اقتصادی و مقرون به‌صرفه را دارد (Çeribası and Yetis, 2001).

جذب زیستی فلزات سنگین، یک تکنولوژی نسبتاً جدید برای تصفیه پساب‌های صنعتی است و هدف از آن، حذف فلزات سمی و پاک‌سازی محیط‌زیست و همچنین بازیافت فلزات با ارزش است. تجمع زیستی روش استفاده از جاذب‌های زیستی برای حذف فلزات سنگین، یک فرایند پیچیده با استفاده از میکروارگانیزم‌های زنده است. ریزجلبک‌ها به‌صورت جذب درونی و جذب سطحی قادرند آلاینده‌های مختلف را از محیط آبی حذف کنند. مکانیسم جذب فلزات سنگین از طریق جلبک‌ها، به دلیل وجود ترکیبات پلی‌ساکارید، پروتئین و گروه‌هایی مانند آمینواسید، هیدروکسیل، کربوکسیل، و سولفات‌ها در ساختار سلولی آن است که با ایجاد پیوند با فلزات سنگین، باعث جذب زیستی این فلزات می‌شود (Sayadi et al., 2019). امروزه تصفیه زیستی آلاینده‌ها با استفاده از جلبک‌ها کاربردهای بسیاری دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به حذف مواد غذایی و ترکیبات آلی از پساب‌ها، تعدیل پساب‌های اسیدی و حاوی فلزات سنگین، جداکردن و جذب دی‌اکسید کربن و سنجش ترکیبات سمی توسط حسگرهای زیستی اشاره کرد (Salmani et al., 2018).

توجه محققانی که در حوزه تصفیه آب و پساب به‌دنبال روش‌های

ورود آلاینده‌های مختلف از طریق انواع پساب‌ها به منابع آبی موجب شده تا ضمن ورود فلزات سنگین به چرخه غذایی و بروز آثار سوء بر موجودات زنده و در راس زنجیره غذایی بر انسان، کیفیت آب‌های شیرین در دسترس نیز کاهش یابد. فلزات سنگین برای انسان بسیار سمی، غیرقابل تجزیه زیستی و سرطان‌زا هستند و قابلیت تجمع زیستی بالایی در زنجیره غذایی دارند. برخی از فلزات سنگین مانند جیوه، سرب، کادمیوم، نیکل و کروم حتی در مقادیر پایین نیز می‌توانند سمی باشند. وجود این فلزات سنگین در آب آشامیدنی می‌تواند سلامت موجودات زنده را به خطر بیندازد؛ بنابراین، تصفیه و حذف آلاینده‌های فلزات سنگین از منابع آب یک امر ضروری و حیاتی است (Emenike et al., 2021). آلودگی آب با فلزات سنگین به لحاظ خواص شیمیایی، پایدار بوده و در محیط طبیعی، غیرقابل تجزیه و دارای سمیت هستند و به‌عنوان منبع بسیار مهمی از آلودگی در محیط‌زیست شناخته می‌شوند. فلزات سنگین می‌توانند در محیط آبی با مواد آلی تعامل کرده، در رسوب‌های آبی تجمع کرده، در اثر فرآیندهای مختلف آزاد شده و وارد زنجیره غذایی انسان و سایر موجودات شوند (Alkorta et al., 2004).

نیکل یکی از فلزات سنگین موجود در آب‌های سطحی است. ورود منابع آلوده شهری ممکن است این مقادیر را بیش از پنج برابر حالت عادی افزایش دهد. وجود مقادیر کم نیکل برای تولید سلول‌های قرمز خون در بدن انسان ضروری بوده، هرچند در مقادیر بالا تا حدودی می‌تواند سمی باشد. به‌نظر می‌رسد نیکل در کوتاه‌مدت مشکلاتی ایجاد نمی‌کند، اما در طولانی مدت می‌تواند باعث کاهش وزن بدن، آسیب قلبی عروقی، کبد، تحریک و حساسیت بالا شود (Renu et al., 2021). نیکل می‌تواند در آب‌زیان تجمع یابد. اغلب نمک‌های نیکل که از طریق غذا وارد بدن می‌شوند، دفع می‌شوند. نیمه عمر نیکل حدود ۱۱ ساعت است. بیشترین غلظت نیکل در استخوان، ریه، کلیه و کبد دیده می‌شود. سمی‌ترین ترکیب نیکل که اغلب در صنایع استخراج نیکل مشاهده می‌شود، کربونیل نیکل است. سمیت نیکل به صورت آلرژی، سرطان، مسمومیت قلبی-عروقی و اختلالات تنفسی دیده می‌شود. نیکل در غلظت‌های کم باعث سردرد، سرگیجه، حالت تهوع، سرفه‌های خشک و سخت می‌شود و در غلظت‌های بالاتر می‌تواند باعث بروز سرطان‌های ریه، مجاری تنفسی و استخوان شود (Chakraborty, 2023).

جذب فلزات سنگین با پایداری بالا در محیط یکی از

سنگین نیکل توسط جلبک *Chaetoceros* تأثیر غلظت نیکل در تماس با جلبک، مدت زمان تماس و دمای محیط بر حذف نیکل از محیط آبی توسط جلبک *Chaetoceros* بررسی می شود. هم چنین تعیین ظرفیت جذب جاذب بیولوژیکی *Chaetoceros* با محاسبه ایزوترم های جذب سطحی از دیگر اهداف پژوهش حاضر است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد و تجهیزات

استوک جلبک *Chaetoceros sp.* از بانک ملی جلبک ایران تهیه شد. در این تحقیق که در محیط آزمایشگاهی صورت گرفت از محلول استاندارد نیکل با غلظت های مختلف برای تهیه پساب استفاده شد. به همین منظور از نمک سولفات نیکل ساخت شرکت مرک آلمان استفاده شد. کشت جلبک در محیط کشت گیلارد انجام شده و کلیه مواد مورد نیاز محیط کشت (جدول ۱) از شرکت مرک تهیه شد (Cabanayan-Soy et al., 2021).

جدول ۱- محیط کشت گیلارد

نام محلول	نام ماده	مقدار مورد نیاز
Main Solution	NaNO ₃	۰/۰۷۵ گرم
	NaH ₂ PO ₄ .H ₂ O	۰/۰۰۵ گرم
	Na ₂ SiO ₃ .9H ₂ O	۰/۰۳ گرم
	EDTA Na	۴/۴ میلی گرم
	Biotin	۰/۵ میکروگرم
	Thiamine	۱۰۰ میکروگرم
	B ₁₂	۰/۵ میکروگرم
	Trace Element Solution	۱ میلی لیتر
Trace Element Solution	Filtered Seawater	۱۰۰۰ میلی لیتر
	Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	۰/۶ میلی گرم
	FeCl ₃ .6H ₂ O	۰/۳۲ گرم
	MnCl ₂ .4H ₂ O	۰/۰۲ گرم
	CuSO ₄ .5H ₂ O	۰/۰۰۱ گرم
	CoCl ₂ .6H ₂ O	۰/۰۰۱ گرم
	ZnSO ₄ .7H ₂ O	۰/۰۰۲ گرم
Distilled Water	۱۰۰ میلی لیتر	

برای ساخت محیط کشت گیلارد، مطابق جدول ۱، محلول اصلی و Trace به طور جداگانه ساخته شده و با نسبت های مشخص ترکیب شد. آنالیز رشد با استفاده از اسپکتروفتومتر (Unico, UV-2100 Spectrophotometer) و آنالیز جذب فلز سنگین با استفاده از طیف سنج جذب اتمی (Varia Spectra AA 220FS) انجام شد.

زیستی و ارزان قیمت هستند قرار گرفته است. *Chaetoceros sp.* از جنس دیاتومه ها و از رده *Bacillariophyceae* است که با ۳۸ درصد پروتئین، به عنوان گونه ای دریایی شناخته می شود که در آب شیرین هم یافت می شود. این جلبک دارای زمان دو برابر شدن (Doubling time) ۱/۱۸ روزه بوده که به عنوان یک گونه دریایی وابستگی زیادی به پارامتر شوری داشته و میزان نمک موجود در آب تأثیر مستقیمی بر رشد این جلبک دارد. شوری مناسب برای رشد این جلبک حدود ۴ درصد بوده و کاهش غلظت نمک در محیط رشد آن موجب کاهش رشد سلولی و چگالی سلولی می شود (Supramaetakorn et al., 2019). اندازه سلول های *Chaetoceros* حدود ۱۲ الی ۳۰ میکرومتر است. این جلبک فاقد تاژک بوده و قادر به حرکت نیست. از لحاظ مورفولوژیکی از زاویه کناری به شکل مستطیلی و از بالا به شکل بیضی بوده و سلول های تشکیل دهنده آن زنجیره وار در کنار یکدیگر قرار دارند (شکل ۱). سته های آن نیز در مابین سلول ها به وضوح پیدا است. سلول های آن می توانند به صورت صاف یا پیچ خورده باشند و به صورت منفرد و گروهی در محیط آبی زندگی کنند. برخی از *Chaetoceros* ها دارای اسپورهای ساکن یا آگزواسپور هستند (Kaczmarek et al., 2001). *Chaetoceros sp.* دارای کلروفیل های a و c، بتاکاروتن رنگ دانه های گزانتوفیلی مانند دیاتوزانتین و فوکوزانتین است. برخی جلبک ها مانند *Chaetoceros* به عنوان جاذب های زیستی و ارزان قیمت قادرند یون های فلزات سنگین نظیر سرب و کادمیوم را از آب های آلوده جذب کنند (Goswami et al., 2022).



شکل ۱- ساختار سلولی *Chaetoceros sp.*

هدف مطالعه حاضر استفاده از جلبک *Chaetoceros* برای حذف نیکل از محیط های آلوده آبی، بررسی اثر پارامترهای موثر بر جذب فلز نیکل با استفاده از این جلبک در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی و تعیین شرایط بهینه و بررسی کارایی جلبک *Chaetoceros* در حذف زیستی فلز نیکل است. در این مطالعه با شناسایی و بهینه سازی شرایط مناسب برای حذف آلودگی فلز

۲-۲- بررسی شرایط بهینه رشد

برای بررسی شرایط بهینه رشد *Chaetoceros* اثر سه پارامتر دما، شدت نور و چرخه تاریکی روشنایی مورد بررسی قرار گرفت. طراحی آزمایش با استفاده از روش RSM در سه سطح انجام شد. محدوده پارامترهای مورد بررسی برای شدت نور ۳۰۰، ۴۵۰ و $600 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ، دما ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد و چرخه تاریکی روشنایی ۱۲-۱۲، ۱۸-۶ و ۲۴-۰ در نظر گرفته شد (Spilling et al., 2015). پس از مشخص شدن شرایط بهینه کشت، تست‌های جذب نیکل تحت شرایط بهینه رشد انجام شد. رشد جلبک در ارلن‌های ۵۰۰ میلی‌لیتری انجام شده که حجم کشت ۳۰۰ میلی‌لیتر بود. به این منظور ۱۰ درصد استوک جلبک (۳۰ میلی‌لیتر) که در فاز لگاریتمی قرار دارد به ۹۰ درصد محیط کشت (۲۷۰ میلی‌لیتر) اضافه شد. کشت‌ها با استفاده از پمپ هوا تحت هوادهی با دبی حجمی ۸۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، شوری ۳۳ ppt و شرایط طراحی شده شدت نور، دما و دوره نوری (جدول ۲) قرار گرفته و به مدت ۲۰ روز تحت کشت قرار گرفتند.

جدول ۲- طراحی آزمایش پارامترهای کشت با استفاده از روش

RSM			
ردیف	چرخه نوری (day h/night h)	نور ($\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$)	دما ($^{\circ}\text{C}$)
۱	۱۲-۱۲	۳۰۰	۲۰
۲	۱۸-۶	۴۵۰	۲۵
۳	۱۸-۶	۴۵۰	۲۵
۴	۲۴-۰	۳۰۰	۳۰
۵	۱۸-۶	۴۵۰	۲۵
۶	۱۸-۶	۳۰۰	۲۵
۷	۲۴-۰	۶۰۰	۲۰
۸	۱۲-۱۲	۶۰۰	۳۰
۹	۱۸-۶	۴۵۰	۳۰
۱۰	۱۸-۶	۴۵۰	۲۰
۱۱	۱۲-۱۲	۴۵۰	۲۵
۱۲	۱۸-۶	۶۰۰	۲۵
۱۳	۲۴-۰	۳۰۰	۲۰
۱۴	۲۴-۰	۶۰۰	۳۰
۱۵	۲۴-۰	۴۵۰	۲۵
۱۶	۱۲-۱۲	۳۰۰	۳۰
۱۷	۱۲-۱۲	۶۰۰	۲۰

۳-۲- اجرای آزمایش

پس از مشخص شدن شرایط بهینه کشت، توانایی جلبک *Chaetoceros* به عنوان جاذب فلز سنگین نیکل مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور، سلول‌های زنده جلبک در حین فرایند رشد در معرض محلول سولفات نیکل با غلظت‌های مشخص

قرار گرفت. شرایط پایه در این تحقیق شامل ثابت نگه‌داشتن شوری، شدت نور، دوره نوری، دما، شدت هوادهی و pH تحت شرایط رشد جلبک در آزمایشگاه بود. عوامل تاثیرگذار بر حذف نیکل از محیط آبی توسط جلبک *Chaetoceros* شامل دما، زمان تماس و غلظت اولیه محلول نیکل در نظر گرفته شد و در ادامه اثر هر یک بر راندمان حذف نیکل مورد ارزیابی قرار گرفت. به همین منظور میزان جذب سطحی نیکل توسط جلبک *Chaetoceros* تحت دماهای مختلف (۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ درجه سانتی‌گراد)، مدت زمان‌های تماس مختلف (۱، ۲۴ و ۴۸، ۳۶ و ۷۲ ساعت) و غلظت‌های نیکل (۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰) به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفت (Spilling et al., 2015).

میزان رشد جلبک بر اساس معیار چگالی نوری (optical density) در طول موج ۶۸۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-Vis به‌صورت روزانه ثبت شد و غلظت جلبک بر اساس نسبت وزن خشک به چگالی نوری محاسبه شد. برای بررسی میزان جذب نیکل، نمونه‌برداری در زمان‌های مشخص شده (۱، ۲۴، ۳۶، ۴۸ و ۷۲ ساعت) انجام شده و غلظت نیکل توسط دستگاه اسپکتروسکوپی جذب اتمی (AAS) اندازه‌گیری و گزارش شد.

راندمان حذف نیکل (%RE) تحت شرایط بهینه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Turtureanu et al., 2008):

$$\%RE = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

که C_0 و C_t : به‌ترتیب غلظت اولیه و غلظت نهایی محلول نیکل (mg/L) هستند.

۴-۲- مدل ایزوترم جذب لانگمویر

ایزوترم جذب برای تعیین ظرفیت تثبیتی جذب یک آلاینده مشخص به‌کار می‌رود. در مطالعه حاضر معادله لانگمویر (Langmuir) به‌عنوان یکی از ایزوترم‌های معتبر جذب فیزیکی به‌وسیله زیست‌توده‌ها که برای جذب تک لایه‌ای روی سطوح با تعداد محدودی از موقعیت‌های جذب یکسان، به‌کار می‌رود، مورد استفاده قرار گرفت (Langmuir, 1918).

۵-۲- طراحی آزمایش تجزیه و تحلیل نتایج

برای بررسی شرایط بهینه رشد *chaetoceros* طراحی آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Design Expert Version 10.0.7.0 با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) انجام شد. برای طراحی

۲۵ کشت به صورت هم زمان گذاشته شده و با توجه به شرایط بهینه رشد در بخش قبل، در روز ام کشت، فلز نیکل با غلظت های ۲۰ تا ۶۰ میلی گرم بر لیتر به نمونه ها اضافه شد. جذب زیستی در ۵ دمای ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد در بازه های زمانی ۱ تا ۷۲ ساعت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در شکل های ۳ تا ۷ آورده شده است.

آزمایش سه پارامتر نور، دما و چرخه تاریکی/روشنایی در سه سطح تعریف شد. نمودارها با استفاده از نرم افزار Microsoft 2010 Excel رسم شد.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی شرایط بهینه رشد *Chaetoceros*

بر اساس طراحی آزمایش انجام شده ۱۷ تست تحت شرایط تعریف شده در طراحی آزمایش انجام شد. با توجه به جدول ۳، در شرایطی که دما ۳۰ درجه سانتی گراد، شدت تابش نور $600 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ و چرخه نوری ۱۲ ساعت نور ۱۲ ساعت تاریکی بود، بالاترین راندمان رشد جلبک *Chaetoceros* حاصل شد. نتایج بیانگر این بود که حداکثر غلظت جلبک تولیدی به میزان ۲/۰۶ گرم بر لیتر رسیده و لذا این شرایط (دمای ۳۰ درجه سانتی گراد، شدت تابش نور $600 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ و چرخه نوری ۱۲-۱۲) به عنوان شرایط پایه برای رشد ریزجلبک در آزمایش های اصلی در نظر گرفته شد.

بررسی شرایط رشد روزانه جلبک *Chaetoceros* در شرایط بهینه رشد بیانگر این است که جلبک پس از طی یک روز از کشت اولیه وارد فاز لگاریتمی شده، حداکثر چگالی نوری جلبک در روز ۱۳ کشت حاصل شده و پس از آن *Chaetoceros* به تدریج وارد فاز مرگ شده است. با توجه به شکل ۲، برای تست های جذب فلز سنگین، نمونه های حاوی فلز نیکل در روز ۱۳ کشت که رشد جلبک در شرایط حداکثری قرار دارد به نمونه ها اضافه شد.

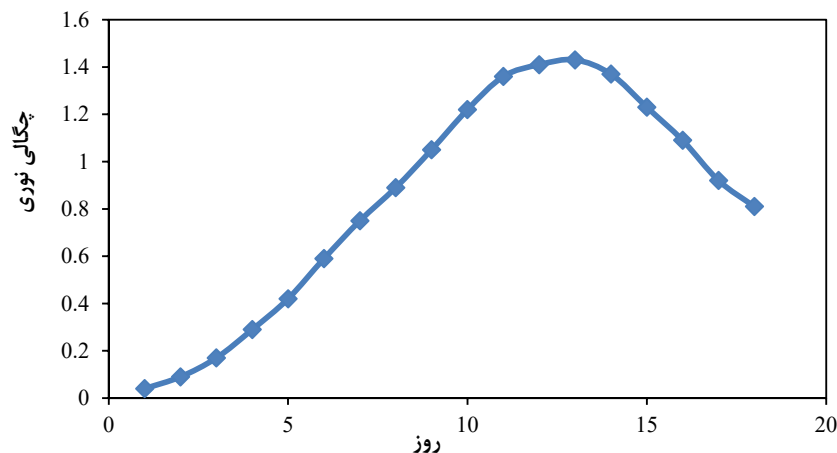
۳-۲- بررسی جذب زیستی

برای بررسی جذب زیستی فلز نیکل توسط *Chaetoceros*.

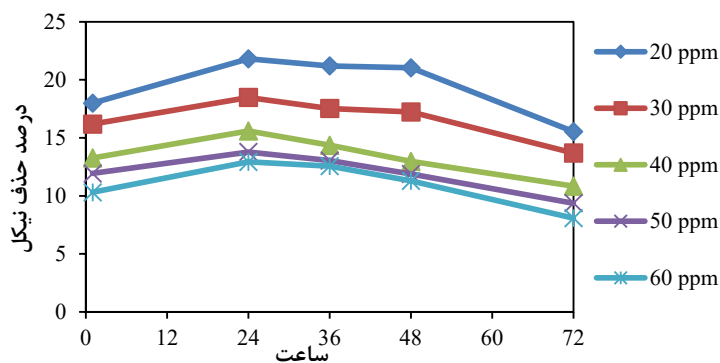
جدول ۳- نتایج بررسی شرایط بهینه ی رشد *Chaetoceros* بر اساس

حداکثر غلظت (ماکزیمم رشد)

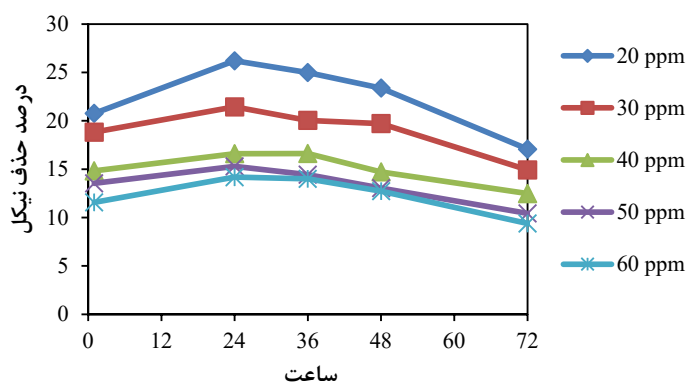
ردیف	چرخه نور (day h/night h)	نور ($\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$)	دما ($^{\circ}\text{C}$)	حداکثر غلظت جلبک (gr/lit)
۱	۱۲-۱۲	۳۰۰	۲۰	۱/۳۸
۲	۱۸-۶	۴۵۰	۲۵	۱/۳۷
۳	۱۸-۶	۴۵۰	۲۵	۱/۴۱
۴	۲۴-۰	۳۰۰	۳۰	۱/۴۳
۵	۱۸-۶	۴۵۰	۲۵	۱/۳۸
۶	۱۸-۶	۳۰۰	۲۵	۱/۱۷
۷	۲۴-۰	۶۰۰	۲۰	۱/۴۹
۸	۱۲-۱۲	۶۰۰	۳۰	۲/۰۶
۹	۱۸-۶	۴۵۰	۳۰	۱/۵۱
۱۰	۱۸-۶	۴۵۰	۲۰	۱/۲۸
۱۱	۱۲-۱۲	۴۵۰	۲۵	۱/۶۹
۱۲	۱۸-۶	۶۰۰	۲۵	۱/۴۳
۱۳	۲۴-۰	۳۰۰	۲۰	۱/۱۲
۱۴	۲۴-۰	۶۰۰	۳۰	۱/۵۵
۱۵	۲۴-۰	۴۵۰	۲۵	۱/۳۵
۱۶	۱۲-۱۲	۳۰۰	۳۰	۱/۶۵
۱۷	۱۲-۱۲	۶۰۰	۲۰	۱/۸۸



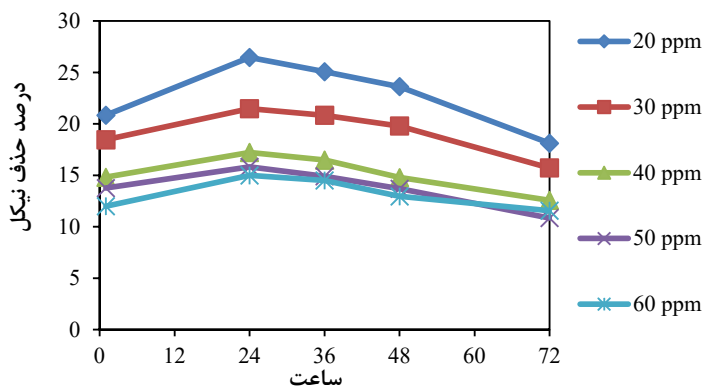
شکل ۲- نمودار رشد جلبک *Chaetoceros* در شرایط بهینه بر حسب چگالی نوری



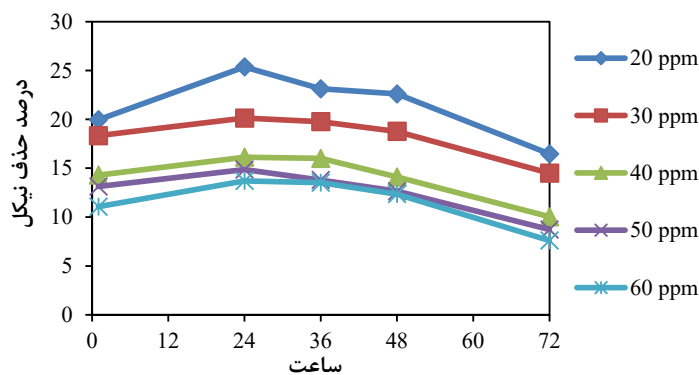
شکل ۳- اثر زمان تماس بر درصد حذف نیکل توسط *Chaetoceros* در غلظت‌های متفاوت فلز سنگین و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد



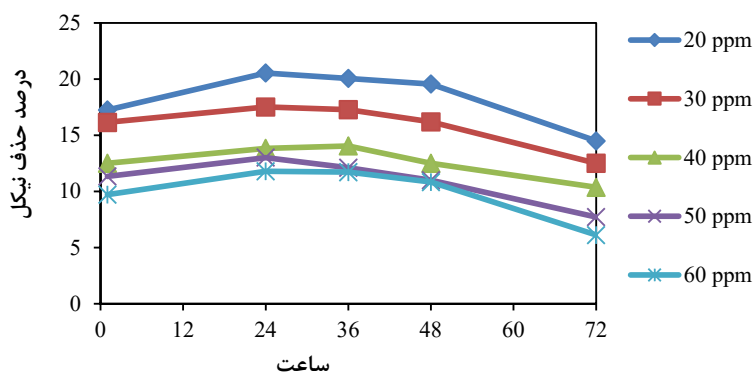
شکل ۴- اثر زمان تماس بر درصد حذف نیکل توسط *Chaetoceros* در غلظت‌های متفاوت فلز سنگین و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۵- اثر زمان تماس بر درصد حذف نیکل توسط *Chaetoceros* در غلظت‌های متفاوت فلز سنگین و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۶- اثر زمان تماس بر درصد حذف نیکل توسط *Chaetoceros* در غلظت‌های متفاوت فلز سنگین و دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد



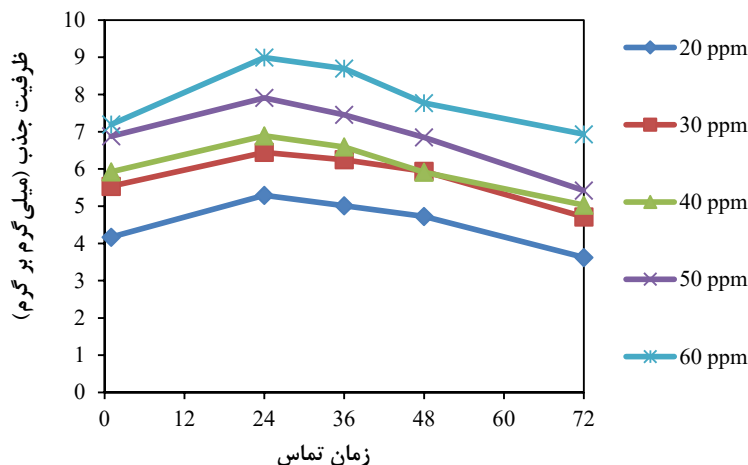
شکل ۷- اثر زمان تماس بر درصد حذف نیکل توسط *Chaetoceros* در غلظت‌های متفاوت فلز سنگین و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد

نیکل در شرایطی به‌دست آمد که غلظت نیکل ورودی به محیط جلبک ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. در این شرایط جذب زیستی فلز نیکل در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و زمان تماس ۲۴ ساعت به میزان ۲۶/۴۶ درصد بوده است. هم‌چنین با توجه به این‌که جذب زیستی به مدت ۷۲ ساعت بررسی شده و با وجود کاهش حذف فلز سنگین، سلول‌های جلبک از بین نرفته‌اند، لذا به‌نظر می‌رسد که جلبک *Chaetoceros* مقاومت بالایی در برابر سمیت فلز نیکل از خود نشان می‌دهد.

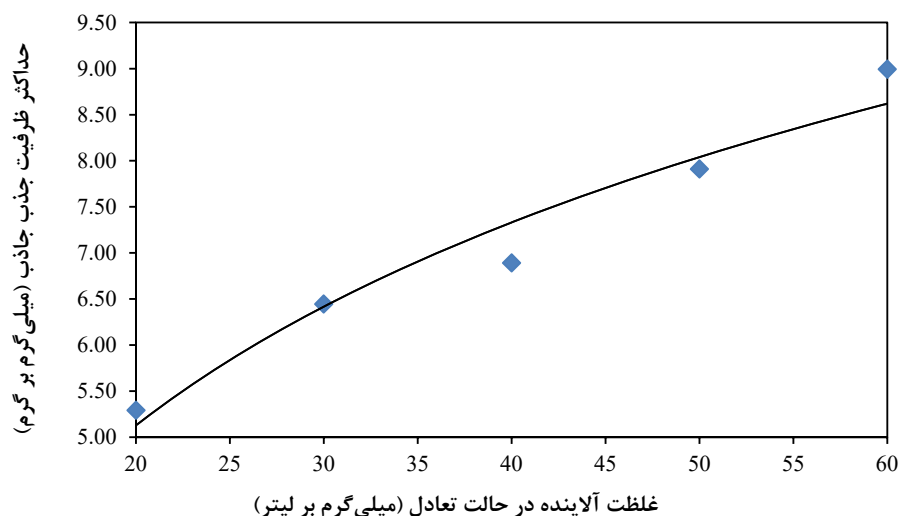
۳-۳- مدل‌سازی جذب زیستی نیکل

ظرفیت جذب برحسب غلظت تعادلی، برای رسم نمودار جذب و لانگمویر استفاده شد (Zhou et al., 2021). تغییرات ظرفیت جذب جلبک *Chaetoceros* در دمای بهینه، غلظت‌های مختلف فلز سنگین نیکل و زمان تماس‌های متفاوت در شکل ۸ آورده شده است. هم‌چنین با توجه به نتایج شکل ۸، حداکثر ظرفیت جذب جلبک *Chaetoceros* در غلظت‌های متفاوت فلز سنگین نیکل در شکل ۹ ارائه شده است.

بررسی نتایج بیانگر این است که به‌طور کلی با افزایش دما تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، میزان جذب زیستی جلبک *Chaetoceros* افزایش یافته و پس از آن افزایش دما تاثیر معکوس بر روند جذب دارد. با توجه به شرایط دمایی بهینه رشد جلبک *Chaetoceros* (۳۰ درجه سانتی‌گراد)، به‌نظر می‌رسد افزایش دما به بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد با تاثیر منفی بر روند رشد ریزجلبک، باعث کاهش راندمان جذب زیستی می‌شود. با توجه به نتایج، حداکثر راندمان جذب در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. بررسی غلظت فلز سنگین نیکل نیز بیانگر تاثیر منفی افزایش غلظت فلز سنگین بوده و غلظت‌های بالاتر نیکل به‌دلیل اثر سمیت بر سلول‌های جلبک باعث کاهش جذب زیستی شد. بررسی مدت زمان برخورد در بازه ۱ تا ۷۲ ساعت نشان داد که با افزایش زمان برای تماس جاذب و یون فلز، درصد حذف نیکل در ۲۴ ساعت اولیه صعودی بوده و افزایش یافته و پس از آن این میزان کاهش می‌یابد که احتمالاً به‌دلیل اثر سمیت فلز نیکل باقی‌مانده در محیط بر سلول‌های جلبک *Chaetoceros* است. نتایج جذب زیستی نشان داد که حداکثر حذف فلز سنگین



شکل ۸- مقایسه ظرفیت جذب جلبک *Chaetoceros* در غلظت‌های مختلف نیکل برحسب غلظت تعادلی در طول زمان تماس



شکل ۹- میزان حداکثر ظرفیت جذب غلظت‌های مختلف یون نیکل توسط جلبک *Chaetoceros*

با استفاده از نتایج به‌دست آمده از این مطالعه و معادله لانگمویر، ثابت‌های حاصل از تطبیق داده‌های تجربی بر ایزوترم تعادلی، R^2 (ضریب همبستگی) برابر با ۰/۹۵ و ضریب b برابر با ۰/۱۷۴ لیتر بر میلی‌گرم به‌دست آمد. پارامترهای ایزوترم لانگمویر برای جذب نیکل توسط جلبک *Chaetoceros* در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

با توجه به محاسبات انجام شده و نتایج حاصل از مطالعه حاضر و با توجه به جدول‌های ۴ و ۵، نمودار ایزوترم لانگمویر برای جذب نیکل برطبق رابطه لانگمویر که در بخش قبل به تفصیل توضیح داده شد، محاسبه و نمودار آن رسم شد (شکل ۱۰). نتایج نشان می‌دهند که ایزوترم لانگمویر برای فلز نیکل، بهتر از سایر مدل‌ها می‌تواند داده‌های جذب زیستی را برازش کند.

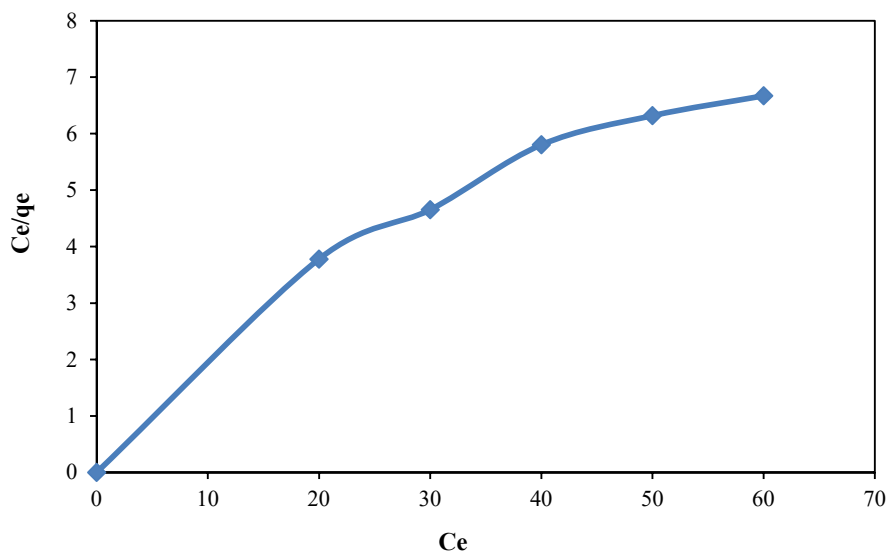
همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است با افزایش غلظت فلز سنگین، حداکثر ظرفیت جذب افزایش یافته و نمودار به‌صورت صعودی با شیب کاهشی است. چنان‌که در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر فلز نیکل، حداکثر ظرفیت جذب ۵/۲۹ میلی‌گرم بر گرم بوده که با افزایش غلظت، حداکثر ظرفیت جذب افزایش یافته تا در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر، به‌میزان ۸/۹۹ میلی‌گرم می‌رسد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در صورت بررسی درصد جذب، با توجه به این‌که محاسبات برحسب درصد انجام شده، به‌طور کلی بیش‌ترین درصد جذب در غلظت ۲۰ ppm مشاهده می‌شود. اما در شرایطی که ظرفیت جذب در نظر گرفته شود (با توجه به این‌که محاسبات ظرفیت جذب برحسب گرم فلز سنگین جذب شده است)، با وجود درصد جذب کمتر، بیشترین ظرفیت جذب در غلظت ۶۰ ppm مشاهده می‌شود.

جدول ۴- پارامترهای ایزوترم لانگمویر برای جذب نیکل توسط جلبک *Chaetoceros*

فلز سنگین نیکل	پارامترهای ایزوترم لانگمویر
۸/۹۹	q_m (mg/g)
۰/۱۷۴	b (L/mg)
۰/۹۵	R^2

جدول ۵. پارامترهای غلظت C_e و غلظت تقسیم بر میزان جذب C_e/q_e ایزوترم لانگمویر برای جذب نیکل توسط جلبک *Chaetoceros*

C_e/q_e	C_e
۰/۰۱	۰/۰۱
۲/۷۷	۲۰
۴/۶۵	۳۰
۵/۸۰	۴۰
۶/۳۲	۵۰
۶/۶۷	۶۰



شکل ۱۰- ایزوترم لانگمویر برای جذب نیکل توسط جلبک *Chaetoceros*

۴- بحث

چرخه نور بر رشد این جلبک انجام نشده است (Molazadeh et al., 2015). با این وجود به دلیل وابستگی کم *Chaetoceros* به فتوسنتز، به نظر می‌رسد چرخه نور-روشنایی تاثیر چندانی بر رشد این دیاتومه ندارد (Chen et al., 2023).

نتایج به دست آمده در بخش حذف فلز سنگین در مطالعه حاضر، بیانگر این بود که به طور کلی در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر فلز نیکل، جلبک *Chaetoceros sp.* بالاترین راندمان جذب را داشته و غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر فلز نیکل راندمان جذب را به شکل قابل توجهی کاهش داده است. با این وجود با توجه به این که میزان فلز سنگین نیکل در غلظت ۶۰ ppm سه برابر میزان آن در ۲۰ ppm است، با وجود درصد جذب پایین تر فلز نیکل در غلظت ۶۰ ppm، میزان جذب فلز (برحسب میلی‌گرم) در این شرایط بیشتر از شرایطی است که غلظت نیکل ۲۰ ppm بود. کاهش راندمان جذب در اثر افزایش غلظت فلز سنگین، به دلیل اثر سمیت سلولی غلظت بالای نیکل بوده که باعث می‌شود سایت‌های فعال جاذب زیستی سریع تر پر شده و با وجود افزایش ظرفیت جذب موجب کاهش میزان فلز سنگین جذب شده شود (Molazadeh et al., 2015).

با توجه به نتایج مطالعه حاضر بالاترین راندمان جذب در دمای ۳۰ درجه، زمان تماس ۲۴ ساعت و غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر فلز سنگین حاصل شد که در این شرایط درصد جذب فلز سنگین نیکل توسط *Chaetoceros sp.* به ۲۶/۲۱ درصد رسید. مطالعه Pahlavanzadeh et al. (2010) بیانگر این بود که افزایش غلظت فلز نیکل موجب کاهش درصد جذب می‌شود. با این حال در این مطالعه حداقل میزان نیکل که بالاترین راندمان جذب را

در تحقیق حاضر جذب زیستی فلز سنگین نیکل توسط جلبک *Chaetoceros sp.* مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر سه پارامتر دما، غلظت فلز سنگین و زمان تماس جلبک و فلز سنگین بر میزان جذب زیستی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ابتدا شرایط رشد بهینه‌ی جلبک *Chaetoceros sp.* بررسی و زمانی که جلبک به حداکثر رشد خود می‌رسد مشخص شد.

نتایج نشان داد که جلبک *Chaetoceros sp.* در دمای ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، شدت نور $600 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ و چرخه نوری ۱۲ ساعت روشنایی ۱۲ ساعت تاریکی بالاترین راندمان رشد را داشته و در روز ام رشد به حداکثر غلظت به میزان ۲/۰۶ گرم بر لیتر رسید. در مطالعه (Krichnavaruk et al. (2005)، حداکثر رشد *Chaetoceros* در شدت نور $400 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ در محیط کشت F/2 به دست آمد. هم‌چنین دمای بهینه رشد *Chaetoceros* ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بود که با مطالعه حاضر مطابقت دارد. جلبک *Chaetoceros* برخلاف ریزجلبک‌های سبز فتوسنتز کننده، وابستگی کمتری به نور داشته و برای رشد نیاز به شدت‌های بالای نور ندارد. مطالعات نشان داده است که نور بیش از حد با آسیب رساندن به پروتئین PS II در سلول *Chaetoceros*، باعث آسیب سلولی می‌شود (Wang et al., 2021). با وجود این که عمده‌ی مطالعات بر روی رشد *Chaetoceros* دمای بهینه رشد را ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و شدت نور بهینه رشد را بین ۴۰۰ تا $600 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ گزارش کرده‌اند، اما به طور کلی مطالعات زیادی بر روی تاثیر

2005). با توجه به مطالعات، فرایند جذب فلزات سنگین توسط جلبک عمدتاً دو مرحله‌ای است. مرحله اول مرحله جذب زیستی است که خیلی سریع و به‌صورت فیزیکی یا شیمیایی اتفاق می‌افتد. این جذب زیستی می‌تواند هم در زیست‌توده و هم در سلول‌های زنده رخ دهد (Khummongkol et al., 1982). مرحله دوم شامل جذب شیمیایی است که فرآیندی آهسته بوده و در طول رشد جلبک و تنها در سلول‌های زنده رخ می‌دهد (Wilde and Benemann, 1993). جذب زیستی معمولاً به‌سرعت و در ابتدای فرایند جذب رخ داده و مطالعات بیانگر تاثیر گروه‌های عاملی آمینو و کربوکسیل بر راندمان جذب زیستی در ابتدای فرایند جذب است.

در دیاتومه‌ها تاثیر گروه عاملی کربوکسیل بر فرایند جذب بالاتر بوده و جذب یون‌های فلز سنگین به خصوص یون‌های دو ظرفیتی بر روی سطح دیاتومه‌ها توسط COOH^- واقع در لایه پلی‌ساکارید خارجی دیواره سلولی انجام می‌شود (Marella et al., 2020). از طرفی برخی پژوهش‌ها عنوان می‌کنند که مقدار فلز جذب شده به‌ازای 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 شود (Ayele et al., 2021).

هم‌چنین بررسی مدل جذب زیستی *Chaetoceros* در مطالعه حاضر بیانگر این بود که جذب زیستی از ایزوترم لانگمویر تبعیت کرده و مقدار R^2 (ضریب همبستگی) مربوط به معادله لانگمویر برای جذب فلز نیکل $0/95$ به‌دست آمد. تبعیت از ایزوترم لانگمویر نشان می‌دهد که جذب به‌وسیله مکان‌های همگن مخصوصی که بر روی ساختار جاذب وجود دارد صورت‌گرفته و هر یک از این مکان‌ها تنها قابلیت جذب یک ردیف مولکول را دارند. در صورت ورود مولکول‌های جدید، هیچ‌گونه تغییری در مکان‌هایی که قبلاً جذب روی آن صورت گرفته، رخ نمی‌دهد و می‌توان گفت فرایند جذب به‌صورت تک‌لایه انجام می‌شود (Zhou et al., 2014). سایر مطالعات انجام شده بر روی جذب فلز نیکل نیز عمدتاً بیانگر تاثیر افزایش غلظت فلز سنگین بر کاهش درصد جذب بوده و نشان داده‌اند که جذب فلز سنگین نیکل توسط ریزجلبک‌ها از مدل لانگمویر تبعیت می‌کنند (Sayadi et al., 2019).

مطالعه حاضر نشان داد که جلبک *Chaetoceros* توانایی جذب فلز سنگین نیکل از محیط آبی را داشته و راندمان جذب بالایی به‌خصوص در غلظت‌های کم نیکل از خود نشان می‌دهد. به‌نظر می‌رسد با افزایش دادن غلظت اولیه یون فلز در محلول

داشته 1000 ppm بوده و جذب بسیار سریعی در 60 دقیقه اول مشاهده شده است که با مطالعه حاضر متفاوت است. به‌نظر می‌رسد که جلبک مورد استفاده در این مطالعه (جلبک دریایی *Chaetomorpha*) ظرفیت جذب بسیار بالاتری نسبت به *Chaetoceros* داشته است. مطالعات انجام شده بر روی جذب سایر یون‌های فلزی سنگین توسط جلبک *Chaetoceros* نیز بیانگر ظرفیت جذب نسبتاً پایین آن و اثر سمیت بالای یون‌های فلزی بر روی این جلبک است. بررسی اثر سمیت یون کادمیوم بر جلبک *Chaetoceros Calcitrans* بیانگر این بود که غلظت $1/0$ از این یون فلزی، رشد جلبک را کاهش داده و غلظت‌های بالای 6 ppm به‌طور کامل مانع از رشد جلبک می‌شود (Makkasau and Sahabuddin, 2023). هم‌چنین مطالعات دیگر نیز بیانگر اثر سمیت نسبتاً بالای فلزات سنگین جیوه، نقره و قلع بر جلبک *Chaetoceros* و در نتیجه تاثیر بر راندمان جذب آن‌ها به‌خصوص در غلظت‌های بالای یون‌های فلزی است (Mosleminejad et al., 2024). از طرف دیگر غلظت اولیه فلز سنگین در محلول‌های آبی مستقیماً بر سرعت جذب تاثیر 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 (active sites) خالی بوده و گرادیان غلظت املاح بالا است در مرحله جذب سریع جاذبه یونی باعث پر شدن سایت‌های فعال جلبک از یون‌های فلزی شده و با کاهش سطوح فعال غلظت‌های بالاتر فلز سنگین، توانایی اتصال به ریزجلبک و جذب توسط آن را ندارند و به‌همین دلیل درصد حذف فلز کاهش می‌یابد (Kaya et al., 2009).

بررسی اثر تماس بیانگر این است که افزایش زمان تماس تا 24 ساعت موجب افزایش راندمان جذب زیستی شده و پس از آن به‌دلیل اثر سمیت سلولی درصد حذف فلز سنگین کاهش یافت. در کلیه نمونه‌ها بالاترین راندمان جذب پس از 24 ساعت حضور فلز سنگین در محیط رشد جلبک *Chaetoceros* مشاهده شد. علت این‌که در ساعت‌های اولیه، فرایند جذب سیر صعودی دارد به‌دلیل زیاد بودن سایت‌های جذب در سطح دیواره سلولی جلبک است. اما به‌تدریج و با گذشت زمان، تعداد سایت‌های فعال کاهش یافته و رقابت برای اشغال سایت‌های فعال باقی مانده توسط یون‌های فلز افزایش می‌یابد و روند صعودی کند می‌شود و نهایتاً به یک مقدار ثابت می‌رسد (Marella et al., 2020).

زمان تماس یکی از پارامترهای مهم در عملکرد موفق و سریع جاذب زیستی است. این عامل به‌طور مستقیم بر واکنش اتصال بین جاذب و یون فلزی در آب تاثیر می‌گذارد (Akar and Tunali,

Ayele, A., Suresh, A., and Benor, S., (2021), "Phycoremediation of heavy metals, factors involved and mechanisms related to functional groups in the algae cell surface, A review", *Strategies and Tools for Pollutant Mitigation: Avenues to a Cleaner Environment*, (pp. 269-289), https://doi.org/10.1007/978-3-030-63575-6_13.

Cabanayan-Soy, R., de Peralta, G. M., and Juinio-Meñez, M.A., (2021), "Assessing the viability of commercial media for the mass culture of *Chaetoceros muelleri*", *The Philippine Journal of Fisheries*, 28(1), 191-199. <https://doi.org/10.31398/tpjf/28.2.2019-0007>.

Çeribasi, I. H., and Yetis, U. (2001), "Biosorption of Ni (II) and Pb (II) by *Phanerochaete chrysosporium* from a binary metal system—kinetics", *Water SA*, 27(1), 15-20, <https://doi.org/10.4314/wsa.v27i1.5004>.

Chakraborty, B.K., (2023), "Effect of pesticide and heavy metal toxicants on fish and human health", *Journal of Crop and Weed*, 19(1), 110-118, <https://doi.org/10.22271/09746315.2023.v19.i1.1669>.

Chen, H., Shan, S., Wang, C., Namsaraev, Z., Dubovskiy, I., Zhou, C., Ruan, R., Yan, X., and Cheng, P., (2023), "Mixotrophic culture of *Chaetoceros sp.* and its response to circadian rhythm", *Algal Research*, 73, 103119. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103119>.

Emenike, E.C., Iwuozor, K.O., and Anidiobi, S.U., (2021), "Heavy metal pollution in aquaculture: sources, impacts and mitigation techniques", *Biological Trace Element Research*, 1-17, <https://doi.org/10.1007/s12011-021-03037-x>.

Fu, F., and Wang, Q., (2011), "Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review", *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>.

Goswami, R.K., Agrawal, K., Shah, M.P., and Verma, P., (2022), "Bioremediation of heavy metals from wastewater: a current perspective on microalgae-based future", *Letters in Applied Microbiology*, 75(4), 701-717. <https://doi.org/10.1111/lam.13564>.

Incharoensakdi, A., and Kitjahnarn, P., (2002), "Zinc biosorption from aqueous solution by a halotolerant cyanobacterium *Aphanothece halophytica*", *Current Microbiology*, 45, 261-264. <https://doi.org/10.1007/s00284-002-3747-0>.

Kaczmarek, I., Ehrman, J.M., and Bates, S.S., (2001), A review of auxospore structure, ontogeny and diatom phylogeny", In *Proceedings of the 16th International Diatom Symposium*, (pp. 153-168), Athens, Greece, University of Athens.

Kalash, K.R., Alalwan, H.A., Al-Furajji, M.H., Alminshid, A.H., and Waisi, B.I., (2020), "Isothermal and kinetic studies of the adsorption removal of Pb (II), Cu (II), and Ni (II) ions from aqueous solutions using modified *Chara sp.* Algae", *Korean Chemical Engineering Research*, 58(2), 301-306, <https://doi.org/10.9713/kcer.2020.58.2.301>.

Kaya, Y., Aksakal, Ö., and Uçun, H., (2009), "Biosorption of lead (ii) and zinc (ii) from aqueous solutions by Nordmann fir (*Abies nordmanniana* (Stev.) Spach. subsp. *nordmanniana*) cones", *Acta*

احتمال تماس سایت های پذیرنده جاذب با یون بیشتر می شود ولی درصد حذف کاهش پیدا می کند، به این علت که در غلظت های پایین، نسبت مکان های اتصال در سطح زیست توده به یون فلز بیشتر است. ولی در نتیجه افزایش یافتن غلظت فلز، به علت کمبود تعداد مکان های فعال در دسترس در سطح زیست توده جلبک، درصد حذف فلز کاهش می یابد. هم چنین مدت زمان برخورد بین جلبک و فلز سنگین پارامتر مهمی بوده که افزایش بیش از حد آن به دلیل اثر سمیت سلولی راندمان جذب را کاهش می دهد. در این مطالعه داده های تعادلی برای جذب نیکل با مدل جذب لانگمویر تطابق داشته که بیانگر جذب تک لایه است.

۵- نتیجه گیری

مطالعه حاضر نشان داد که جلبک *Chaetoceros* توانایی جذب فلز سنگین نیکل از محیط آبی را داشته و راندمان جذب بالایی به خصوص در غلظت های کم نیکل از خود نشان می دهد. به نظر می رسد با افزایش دادن غلظت اولیه یون فلز در محلول احتمال تماس سایت های پذیرنده جاذب با یون بیشتر می شود ولی درصد حذف کاهش پیدا می کند، به این علت که در غلظت های پایین، نسبت مکان های اتصال در سطح زیست توده به یون فلز بیشتر است. ولی در نتیجه افزایش یافتن غلظت فلز، به علت کمبود تعداد مکان های فعال در دسترس در سطح زیست توده جلبک، درصد حذف فلز کاهش می یابد. هم چنین مدت زمان برخورد بین جلبک و فلز سنگین پارامتر مهمی بوده که افزایش بیش از حد آن به دلیل اثر سمیت سلولی راندمان جذب را کاهش می دهد. در این مطالعه داده های تعادلی برای جذب نیکل با مدل جذب لانگمویر تطابق داشته که بیانگر جذب تک لایه است.

۶- مراجع

Akar, T., and Tunali, S., (2005), "Biosorption performance of *Botrytis cinerea* fungal by-products for removal of Cd (II) and Cu (II) ions from aqueous solutions", *Minerals Engineering*, 18(11), 1099-1109, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.03.002>.

Alkorta, I., Hernández-Allica, J., Becerril, J.M., Amezaga, I., Albizu, I., and Garbisu, C., (2004). "Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic", *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 3(1), 71-90, <https://doi.org/10.1023/b%3Aresb.0000040059.70899.3d>.

- Supramaetakorn, W., Meksumpun, S., Kazuhiko, I., Thawonsode, N., and Veschasit, O., (2019), "Potential fucoxanthin production from a marine diatom", *Journal of Fisheries and Environment*, 43(3), 1-10.
- Turtureanu, A., Georgescu, C., and Oprean, L., (2008), "Nickel removal from aqueous solutions by flotation with cationic collector, Determination of the optimum separation conditions", *Chemical Bulletin*, Politehnica University, (Timișoara), 53(67), 286-288.
- Wang, S.C., Gao, Z.Y., Liu, F.F., Chen, S.Q., and Liu, G.Z., (2021), "Effects of polystyrene and triphenyl phosphate on growth, photosynthesis and oxidative stress of *Chaetoceros meülleri*", *Science of The Total Environment*, 797, 149180, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149180>.
- Wilde, E.W., and Benemann, J.R., (1993), "Bioremoval of heavy metals by the use of microalgae", *Biotechnology Advances*, 11(4), 781-812, [https://doi.org/10.1016/0734-9750\(93\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0734-9750(93)90003-6).
- Zhou, H., Zhao, X., Kumar, K., Kunez, T., Zhang, Y., Gross, M., and Wen, Z., (2021), "Removing high concentration of nickel (II) ions from synthetic wastewater by an indigenous microalgae consortium with a Revolving Algal Biofilm (RAB) system", *Algal Research*, 59, 102464, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102464>.
- Zhou, W., Chen, P., Min, M., Ma, X., Wang, J., Griffith, R., Hussain, F., Peng, P., Xie, Q., Li, Y., and Shi, J., (2014), "Environment-enhancing algal biofuel production using wastewaters", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 256-269, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.073>.
- Chimica Slovenica, 56, 451-456.
- Khummongkol, D., Canterford, G.S., and Fryer, C., (1982), "Accumulation of heavy metals in unicellular algae", *Biotechnology and Bioengineering*, 24(12), 2643-2660, <https://doi.org/10.1002/bit.260241204>.
- Krichnavaruk, S., Loataweesup, W., Powtongsook, S., and Pavasant, P., (2005), "Optimal growth conditions and the cultivation of *Chaetoceros calcitrans* in airlift photobioreactor", *Chemical Engineering Journal*, 105(3), 91-98, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2004.10.002>.
- Langmuir, I., (1918), "The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum", *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361-1403, <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>.
- Makkasau, A., and Sahabuddin, E.S., (2023), "Addition of Cd 2+ metal ions to conway culture medium on Phytoplankton growth of *Chaetoceros calcitrans*", *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 13(6), 2052-2059.
- Marella, T.K., Saxena, A., and Tiwari, A., (2020), "Diatom mediated heavy metal remediation: A review", *Bioresource Technology*, 305, 123068, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123068>.
- Molazadeh, P., Khanjani, N., Rahimi, M.R., and Nasiri, A., (2015), "Adsorption of lead by microalgae *Chaetoceros* sp. and *Chlorella* sp. from aqueous solution", *Journal of Community Health Research*, 4(2), 114-127.
- Mosleminejad, N., Ghasemi, Z., and Johari, S.A., (2024), "Ionic and nanoparticulate silver alleviate the toxicity of inorganic mercury in marine microalga *Chaetoceros muelleri*", *Environmental Science and Pollution Research*, 31(13), 19206-19225, <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32120-8>.
- Pahlavanzadeh, H., Keshtkar, A.R., Safdari, J., and Abadi, Z., (2010), "Biosorption of nickel (II) from aqueous solution by brown algae: Equilibrium, dynamic and thermodynamic studies", *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 304-310, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.004>.
- Renu, K., Chakraborty, R., Myakala, H., Koti, R., Famurewa, A.C., Madhyastha, H., Vellingiri, B., George, A., and Gopalakrishnan, A.V., (2021), "Molecular mechanism of heavy metals (Lead, Chromium, Arsenic, Mercury, Nickel and Cadmium)-induced hepatotoxicity, A review", *Chemosphere*, 271, 129735, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129735>.
- Salmani, N., Sayadi, M.H., and Rezaei, M.R., (2018), "Optimization of adsorption process of Cr (VI) from aqueous solution using biosynthesized palladium nanoparticles by *spirulina platensis*", *Modares Journal of Biotechnology*, 9(2), 171-177.
- Sayadi, M.H., Rashki, O., and Shahri, E., (2019), "Application of modified *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* powder on the adsorption of heavy metals from aqueous solutions", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103169, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103169>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.