

Research Paper

مقاله پژوهشی

Biosorption of Nickel Ions by *Scenedesmus Obliquus* from Aqueous Solution

Nahid Akhtari¹, Mahnaz Sadat Sadeghi^{2*} and Homeira Agah³

1- M.Sc. Student, 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.

3- Assistant Professor, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Ocean sciences department, Tehran, Iran.

* Corresponding author, Email: mahnaz.sadeghi55@gmail.com

Received: 02/05/2020

Revised: 14/07/2020

Accepted: 14/07/2020

© IWWA

Abstract

Disadvantages of conventional techniques for removal of heavy metals from aquatic systems has led to the application of more efficient methods. Biosorption using microalgae is one of the appropriate methods to remove heavy metals. In this study which is performed on 2019, the efficiency of green algae, *Scenedesmus obliquus* which has a good potential for growing in wastewater, was investigated for the removal of nickel (Ni) as a toxic metal. The algae were first grown up in the BG-11 medium. The algae's optimum growing condition in a medium consisted of Ni ions, were obtained by applying different temperatures in primitive condition: 10 ppm Ni, pH: 7±0.1. The optimum temperature was accordingly obtained as 30°C with OD = 0.81. Subsequently different Ni solutions (0, 0.5, 1, 2, 5, 10 and 20 ppm) at several contact times (1, 7, 14, and 21 day) were considered; while pH and temperature were 7±0.1 and 30±2 °C, respectively. The results demonstrated that the algae have optimum Ni removal efficiency (91.07%) at the Ni concentration of 10 ppm. Equilibrium data for Nickel were fitted well by Langmuir adsorption model with maximum adsorption capacity of 25.76 mg/g at the 4th day contact time. The results showed that the microalgae *S.obliquus*, as a biosorbent, has appropriate capacity to remove heavy metals, especially Ni, from wastewater.

Keywords: Absorption isotherm, Biosorption, Microalgae, Nickel heavy metal, *Scenedesmus obliquus*.

جذب زیستی یون های نیکل از محلول آبی به وسیله

ریز جلبک *Scenedesmus obliquus*

ناهید اختر^۱، مهناز سادات صادقی^{۲*} و همیرا آگاه^۳

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.

۳- استادیار، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، دپارتمان اقیانوس شناسی، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول، ایمیل: mahnaz.sadeghi55@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۳

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹/۰۴/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۴

© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

وجود آلودگی های فلزات سنگین و معایب روش های معمول حذف، سبب شده که مطالعات بر روی روش های کارآمدتر جذب انجام شود. جذب زیستی به وسیله ریزجلبک یکی از روش های مناسب است که مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، ریزجلبک *Scenedesmus obliquus* توان خوبی برای رشد در داخل پساب ها دارد. این پژوهش در سال ۱۳۹۸، کارایی ریزجلبک *Scenedesmus obliquus* را برای حذف نیکل از محلول های آبی مورد بررسی قرار داد. برای تعیین شرایط بهینه رشد جلبک همراه با بیشترین راندمان حذف آلودگی نیکل، ابتدا جلبک در محیط کشت BG-11 کشت داده شد. شرایط غلظت پایه، آلانده نیکل ۱۰ ppm و pH برابر با ۷±۰/۱ در نظر گرفته شد که در این غلظت در دماهای مختلف، دمای بهینه، ۳۰ درجه سانتی گراد با میزان رشد جلبک براساس جذب نوری برابر با ۰/۸۱ به دست آمد. در مرحله بعد برای تعیین غلظت بهینه، غلظت های ۰/۵، ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ ppm نیکل، در زمان های (۱، ۷، ۱۴ و ۲۱ روز) و دمای ۳۰±۲ درجه سانتی گراد و pH برابر با ۷±۰/۱ مورد بررسی قرار گرفت. شرایط بهینه برای جذب فلز توسط جلبک در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد، غلظت ۱۰ ppm بود که در آن مقدار حذف، ۹۱/۰۷ درصد بود. ایزوترم لانگمویر و مدل سینتیک شبه درجه دوم تطابق بهتری با داده ها نشان دادند. داده های تعادل برای نیکل به خوبی با روش جذب لانگمویر برازش شد و حداکثر ظرفیت جذب ۲۵/۷۶ میلی گرم بر گرم در روز چهارم گزارش شد. نتایج این پژوهش نشان داد که ریزجلبک *Scenedesmus obliquus* به عنوان جاذب گیاهی از توان بالایی برای حذف فلز سنگین نیکل برخوردار است.

واژه های کلیدی: ایزوترم جذب، جذب زیستی، ریزجلبک، *Scenedesmus obliquus*، فلز سنگین نیکل.

استخوان و در موارد حاد مرگ از نتایج اثرات ورود فلزات سنگین به بدن انسان است (Järup, 200; Jaishankar et al., 2014; Kumar and Trivedi, 2016).

با توجه به این که فلزات سنگین طی زنجیره غذایی، تمام موجودات زنده را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند، این مسئله موجب شده است که کاربرد روش‌های مختلف حذف فلزات سنگین از جمله استخراج با حلال، رسوب‌گذاری، اکسیداسیون یا احیای شیمیایی، تبادل یونی، اسمز معکوس، جداسازی غشایی، تصفیه الکتروشیمیایی و تبخیر، با هدف جداسازی، حذف و بازیابی فلزات سمی یا گران‌بها رو به گسترش و توسعه باشد (Ahluwalia and Goyal, 2007).

فلزات سنگین تجزیه نمی‌شوند و به تدریج در بدن تجمع می‌یابند. در بافت‌های چربی، عضلات، استخوان‌ها و مفاصل انسان رسوب نموده و انباشته می‌شوند. ضعف عمومی در عضلات، کاهش اشتها، تهوع، التهاب غشاهای مخاطی چشم، بینی و حنجره و همچنین ضایعات پوستی مشکلات باروری، اختلالات روانی و عصبی و بیماری‌های قلبی از عوارض مواجهه با فلزات سنگین است (Gris, Morosinotto et al., 2014). از جمله مهم‌ترین فلزات سنگین موجود در پساب‌های صنعتی می‌توان به قلع، کادمیوم، سرب و نیکل اشاره کرد. نیکل یکی از عمومی‌ترین فلزات در آب‌های سطحی است. ورود منابع آلوده شهری ممکن است این مقادیر را تا بیش از پنج برابر حالت عادی افزایش دهد. مقادیر کم نیکل برای تولید سلول‌های قرمز خون در بدن انسان نیاز است، هرچند در مقادیر بالا تا حدودی می‌تواند سمی باشد. به نظر می‌رسد نیکل در کوتاه‌مدت مشکل خاصی ایجاد نمی‌کند ولی در طولانی‌مدت می‌تواند باعث کاهش وزن بدن، صدماتی به قلب و کبد، تحریک و حساسیت بالا شود. نیکل هم‌چنین می‌تواند در بدن آبریزان تجمع یابد (Blewett and Leonard, 2017).

روش‌های متعددی برای حذف فلزات سنگین از محیط‌های آبی وجود دارد. تبادل یونی^۳ و رسوب‌گذاری نمک^۴ 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 Kitjahn, 2002; Gupta and Rastogi, 2008). 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 و راه‌حل

آلودگی منابع آب با فلزات سنگین^۲ در نتیجه فعالیت‌های صنعتی از جمله مهم‌ترین عوامل مخرب محیط‌زیست بوده و تأثیر زیادی بر زیست‌بوم آبی دارد (Bayramoğlu and Arica, 2008). آلودگی آب در اثر فلزات سنگین به لحاظ خواص شیمیایی پایدار، قابل تجمع بیولوژیکی، غیرقابل تجزیه در محیط طبیعی و سمی بوده و به‌عنوان منبع بسیار مهمی از آلودگی در محیط‌زیست شناخته می‌شوند، بنابراین حذف آن‌ها از پساب‌ها قبل از ورود به محیط زیست امری ضروری است.

فلزات سنگین به‌طور عمده از طریق پساب صنایع وارد محیط‌های آبی شده و با توجه به ساختار مقاوم خود حذف خود به‌خودی آن‌ها حتی در مقادیر بسیار جزئی نیز در طبیعت صورت نمی‌گیرد (Alkorta, Hernández-Allica et al., 2004; Wang and Chen, 2006). از جمله مهم‌ترین راه‌ها برای جلوگیری از اثرات مخرب در نتیجه ورود پساب‌های شهری و صنعتی به محیط‌زیست و به‌خصوص محیط‌های آبی، تصفیه این پساب‌ها قبل از رها شدن در محیط است. امروزه حذف فلزات سنگین از پساب صنایع به‌طور قابل‌توجهی رو به افزایش است که می‌تواند در راستای حفاظت محیط زیست و سلامت انسان‌ها نقش به‌سزایی داشته باشد (Fu and Wang, 2011).

مهم‌ترین مشکل فلزات سنگین عدم متابولیسم شدن آن‌ها در بدن است. فلزات سنگین پس از ورود به بدن دفع نشده و در بافت‌هایی مثل چربی، عضلات، استخوان‌ها و مفاصل رسوب کرده و انباشته می‌شوند که همین امر موجب بروز بیماری‌ها و عوارض متعددی در بدن می‌شود (Zdrojewicz, Popowicz et al., 2016). فلزات سنگین هم‌چنین جایگزین دیگر املاح و مواد معدنی مورد نیاز در بدن می‌شوند. به‌عنوان مثال در صورت کمبود روی در مواد غذایی، کادمیوم جایگزین آن می‌شود (Brzóska and Moniuszko-Jakoniuk, 2001). به‌طور کلی اختلالات عصبی (پارکینسون، آلزایمر، افسردگی، اسکیزوفرنی)، انواع سرطان‌ها، فقر مواد مغذی، برهم خوردن تعادل هورمون‌ها، چاقی، سقط جنین، اختلالات تنفسی و قلبی عروقی، آسیب به کبد، کلیه‌ها و مغز، آلرژی و آسم، اختلالات غدد درون‌ریز، عفونت‌های ویروسی مزمن، کاهش آستانه تحمل بدن، اختلال در عملکرد آنزیم‌ها، تغییر در سوخت و ساز، ناباروری، کم‌خونی، خستگی، تهوع و استفراغ، سردرد و سرگیجه، تحریک‌پذیری، تضعیف سیستم ایمنی بدن، تخریب ژن‌ها، پیری زودرس، اختلالات پوستی، کاهش حافظه، بی‌اشتهایی، التهاب مفاصل، ریزش مو، پوکی

ریزجلبک برای حذف برخی کاتیون‌های سمی مثل کادمیوم از منابع آبی در صنعت کاربرد خوبی دارد (Monteiro, Castro et al., 2009).

سندسموس آبلیکوس از جمله گونه‌هایی است که در زمینه تصفیه پساب نیکل مورد بررسی جامع و کامل قرار نگرفته است. سنجش میزان حذف نیکل از محیط‌های آلوده آبی توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس، تعیین ظرفیت جذب سندسموس آبلیکوس، بررسی پارامترهای موثر بر جذب زیستی و تعیین ایزوترم جذب از اهداف این تحقیق است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- کشت گونه میکروجلبک *Scenedesmus obliquus*

استوک *Scenedesmus obliquus* به‌عنوان یک زیرگونه از جنس *Scenedesmus* و از کلاس Chlorophyceae از بانک ملی جلبک ایران - دانشگاه تهران تهیه شده و در محیط کشت BG-11 در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد کشت داده شد (Gris, Morosinotto et al., 2014). مطالعات نشان می‌دهد که زمان دوبرابر شدن یا Generation time جلبک سندسموس آبلیکوس بین ۱۷ الی ۴۸ ساعت است (Çelekli, Balci et al., 2008). پس از یک مرحله کشت و حصول میزان مناسب میکروجلبک، نمونه تا زمان انجام آزمایش‌ها در یخچال و دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

۲-۲- تاثیر دما بر حذف نیکل

برای بررسی تاثیر دما بر نرخ رشد و میزان جذب زیستی و نیز تعیین دمای بهینه جذب زیستی، ۶ نمونه محلول آبی حاوی ریز جلبک سندسموس آبلیکوس به حجم ۲۰۰ میلی‌لیتر حاوی ۵۰ میلی‌لیتر محلول سولفات نیکل (۱۰ ppm) آماده شده و به راکتورهای زیستی ۵۰۰ میلی‌لیتری منتقل شدند. راکتورهای زیستی در ۶ دمای ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. سولفات نیکل مورد استفاده از نوع خلوص بالا بود و از شرکت Sigma Aldrich آمریکا تهیه شد. میزان رشد جلبک بر اساس چگالی نوری^{۱۱} (OD) در طول موج ۶۸۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتری UV-2100 ساخت شرکت UNICO آمریکا به‌صورت روزانه ثبت شد. برای بررسی میزان جذب نیکل، نمونه‌برداری در روزهای اول، هفتم، چهاردهم و بیست و یکم انجام شده و غلظت نیکل توسط دستگاه اسپکتروسکوپی جذب اتمی (Atomic Absorption)

اقتصادی‌تری محسوب می‌شود (Çeribas and Yetis, 2001). جاذب‌ها به‌طور کلی به دودسته جاذب‌های طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. جاذب‌های طبیعی اثرات مخرب بر محیط‌زیست نداشته، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه بوده و قادر به جذب فلزات سنگین از محیط آبی به‌صورت جذب شیمیایی و جذب سطحی هستند (Radway, Wilde et al., 2001). جلبک‌ها، مخمرها، قارچ‌ها و باکتری‌ها، توده‌های زیستی هستند که در جذب زیستی^۵ فلزات بیشتر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مقبولی از آن‌ها به‌دست آمده‌است. مقدار بازده جذب زیست‌توده‌های فوق به ظرفیت، میزان پیوند بین مولکول‌ها و ویژگی‌های شیمیایی - فیزیکی و طبیعی آن‌ها بستگی دارد (Gavrilescu, 2004; Srivastava and Majumder, 2008).

استفاده از ریزجلبک^۶ برای تصفیه فاضلاب قدمتی ۴۰ ساله دارد و چندین دهه است که محققان در تلاش برای یافتن روش‌های مناسب تصفیه فاضلاب شهری به کمک ریزجلبک هستند. در سال‌های اخیر حذف فلزات سنگین از پساب توسط ریزجلبک مورد توجه محققان قرار گرفته است. انتخاب ریزجلبک به‌دلیل توانایی بالای آن در سازگاری با ترکیب پساب صورت‌گرفته است. در این راستا تحقیقات و سیستم‌های پایلوت زیادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مطالعات بر روی جذب روی، کادمیوم، کرم و نیکل به‌وسیله ریزجلبک‌ها نشان می‌دهد که میزان جذب زیستی فلزات سنگین تابع pH، میزان یون‌های فلزی و نوع ریزجلبک استفاده شده به‌عنوان جاذب زیستی است (Pena-Castro, Martinez-Jerónimo et al., 2004; Monteiro, Castro et al., 2011). هم‌چنین مطالعات پیشین بر روی جذب زیستی توسط ریزجلبک‌ها بیانگر مزایای مهم این روش از جمله سرعت بالای حذف فلزات سنگین، راندمان بالای جذب، قیمت پایین، عدم تولید پساب سمی و توانایی استفاده به‌صورت سیستم جذب زیستی بسته^۷ و پایدار^۸ است (Monteiro, Castro et al., 2012). ریزجلبک‌های کلرلا^۹ و سندسموس آبلیکوس^{۱۰} توانایی جذب زیستی بالایی را در فلزات سنگین مختلف از جمله نیکل، روی، سرب و کادمیوم نشان داده‌اند (Brinza, Dring et al., 2007). هم‌چنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که زیرگونه‌های کلرلا ولگاریس و سندسموس آبلیکوس بیشترین میزان جذب زیستی فلزات سنگین کادمیوم و مس را دارند (Perales-Vela, Pena-Castro et al., 2006). مطالعه دیگری در سال ۲۰۰۰ با بررسی توانایی جذب زیستی ۱۱ گونه میکروجلبک نشان داد که ریزجلبک سندسموس توانایی کاهش غلظت فلز سنگین نیکل در پساب‌های صنعتی را دارد (Chong, Wong et al., 2000). هم‌چنین این

بنابراین جاذب اشباع شده و جذب بیشتری صورت نخواهد گرفت. ایزوترم لانگمویر بر مبنای دینامیک تعادلی بین فاز جذب شده و فاز بخار یا گاز به دست آمده است. در ابتدای فرآیند جذب، تمامی مکان‌های پیوندی جاذب خالی بوده و آماده جذب است. اگر B : مکان‌های پیوندی (مراکز جذب) و M : جزء جذب شونده باشند، واکنش تعادلی جذب را می‌توان به صورت رابطه (۲) نوشت:



که BM : نشان‌دهنده M جذب شده بر روی جاذب است. با توجه به اینکه تمامی مکان‌های پیوندی سطح جاذب دارای تمایل یکسان برای جذب شونده هستند، می‌توان ثابت تعادلی را به صورت زیر نوشت:

$$b = \frac{[BM]}{[B][M]} \quad (3)$$

با توجه به این که در مدل لانگمویر جذب به صورت تک لایه است در نتیجه حداکثر میزان جذب برابر با تمام مکان‌های پیوندی جاذب است:

$$[BM] + [B] = [TB] \quad (4)$$

با ترکیب روابط (۳) و (۴) معادله (۵) حاصل می‌شود:

$$[BM] = \frac{[B^T]b[M]}{1 + k[M]} \quad (5)$$

که $[BM]$: بیانگر میزان جذب و $[B^T]$: نشان‌دهنده حداکثر میزان جذب هستند.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی رشد ریزجلبک در محیط کشت در شرایط

عدم حضور نیکل

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، با بررسی شرایط رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس براساس چگالی نوری در دمای بهینه رشد (۳۰ درجه سانتی‌گراد)، ریزجلبک پس از طی یک روز از کشت اولیه وارد فاز لگاریتمی شده و حدوداً در روز هشتم به فاز سکون می‌رسد.

(Spectroscopy) اندازه‌گیری و گزارش شد. کلیه آزمایش‌ها با سه تکرار انجام شد.

۲-۳- بررسی میزان عملکرد جذب زیستی بهینه در غلظت‌های متفاوت نیکل

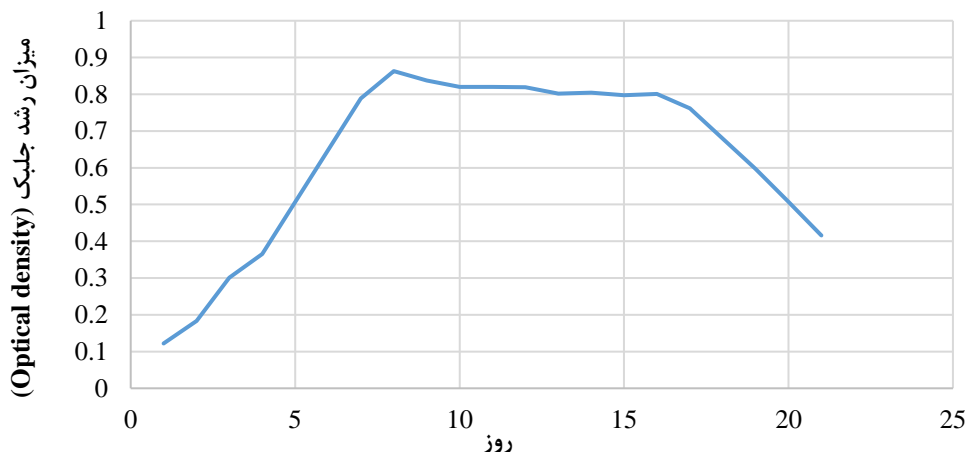
در بخش دوم آزمایش پس از مشخص شدن دمای بهینه‌ی رشد ریزجلبک، غلظت‌های مختلف نیکل (۰/۵، ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ ppm) به محیط کشت ریزجلبک سندسموس آبلیکوس اضافه شده و نرخ رشد و میزان جذب نیکل در طول زمان رشد بررسی شد. به منظور بررسی نرخ رشد میکروجلبک، میزان رشد براساس چگالی نوری در طول موج ۶۸۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتری UV-2100 ساخت شرکت UNICO آمریکا به صورت روزانه ثبت شد. برای بررسی میزان جذب نیکل، نمونه برداری در روزهای اول، هفتم، چهاردهم و بیست و یکم انجام شده و غلظت نیکل در هر نمونه توسط دستگاه اسپکتروسکوپی جذب اتمی (Atomic Absorption Spectroscopy) اندازه‌گیری و گزارش شد. غلظت نهایی یون‌های نامحلول نیکل در انتهای فرآیند به وسیله دستگاه آنالیز جذب اتمی Varian Spectra AA 220FS ساخت آمریکا اندازه‌گیری شد. کلیه آزمایش‌ها با سه تکرار انجام شد.

۲-۴- رسم منحنی ایزوترم جذب

ایزوترم جذب برای تعیین ظرفیت تثوریک جذب یک آلاینده مشخص به کار می‌رود. معادله لانگمویر^{۱۲} یکی از قوانین معتبر جذب فیزیکی به وسیله زیست‌توده‌های غیرزنده است که در بسیاری از موارد صادق است و برای جذب تک لایه‌ای روی سطوح با تعداد محدودی از موقعیت‌های جذب یکسان، به کار می‌رود (Langmuir, 1918). در سیستم‌های مایع-جامد ایزوترم لانگمویر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{max} + 1} + \frac{1}{q_{max} \times b} \quad (1)$$

که q_{max} : ظرفیت جذب تک لایه‌ای جاذب (میلی‌گرم بر گرم)، b : ضریب لانگمویر در ارتباط با انرژی جذب (لیتر بر گرم) و C_e : غلظت آلاینده در حالت تعادل (میلی‌گرم بر گرم) هستند. این ایزوترم برای جذب سطحی تعادلی پویا روی سطوح کاملاً همگن کاربرد دارد و پوششی تک لایه برای سطح جاذب فرض نموده و هیچ فعل و انفعال بین مولکول‌های جذب شده در نظر نمی‌گیرد،

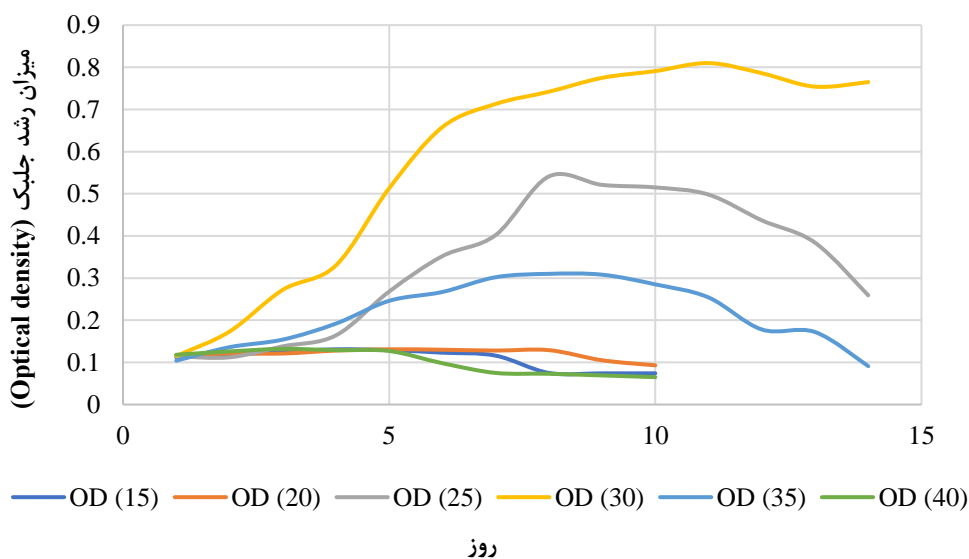


شکل ۱- میزان رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در محیط کشت در شرایط عدم حضور نیکل

نبوده و عملاً جلبک در این دماها رشد نمی‌کند. درحالی‌که رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در حضور غلظت ۱۰ ppm نیکل در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دماهای دیگر بوده و اختلاف فاحش و معناداری با سایر دماها دارد. دلیل این موضوع می‌تواند مناسب بودن این دما به‌طور کلی برای رشد جلبک باشد.

۲-۲- بررسی دمای بهینه رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در حضور غلظت ثابت نیکل

شکل ۲ میزان رشد ریزجلبک در دماهای مختلف را براساس چگالی نوری نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل، دماهای کمتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد به هیچ‌وجه برای رشد جلبک مناسب

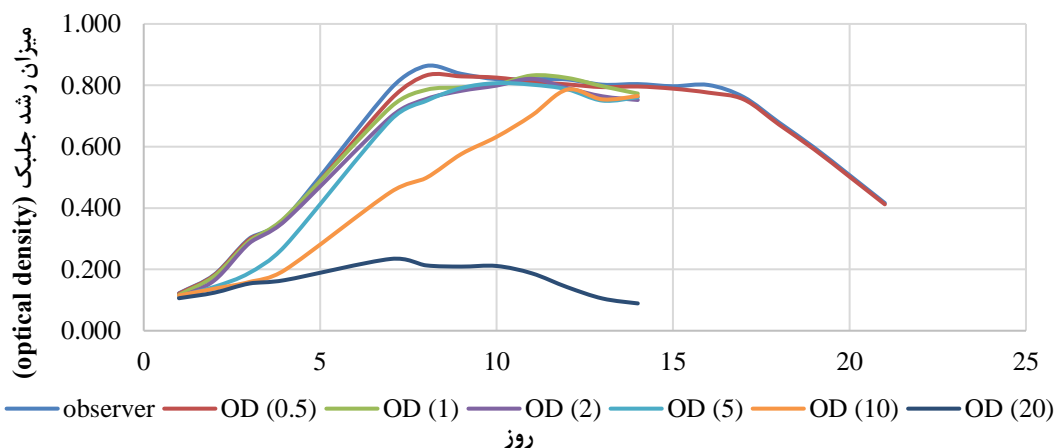


شکل ۲- مقایسه روزانه کشت ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در دماهای مختلف در حضور فلز نیکل با غلظت ۱۰ ppm

غلظت فلز سنگین میزان رشد رفته‌رفته کاهش پیدا کرد. با توجه به نمودارهای رشد، می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور کلی ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در حضور غلظت‌های پایین‌تر از ۲۰ ppm نیکل رشد خوبی داشته و جذب آلاینده‌ی بالایی را دارد. در غلظت‌های ۰/۵ و ۱ ppm همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، رشد تا روز بیست و یکم نیز ادامه داشت، اما در سایر غلظت‌ها عملاً از روز چهاردهم به بعد تمام جلبک‌ها از بین رفته و دیگر رشدی نداشتند و متعاقباً حذفی هم صورت نگرفت.

۳-۲- بررسی میزان رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در غلظت‌های مختلف

با بررسی رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و غلظت‌های متفاوت نیکل، مشخص شد که کلیه کشت‌ها در زمانی کمتر از حداکثر زمان در نظر گرفته برای رشد وارد فاز مرگ شدند. با توجه به نتایج، حداکثر میزان رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در غلظت‌های ۰/۵ ppm (روز هشتم) و ۱ ppm (روز یازدهم) اتفاق افتاد و پس از آن با افزایش



شکل ۳- مقایسه میزان رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در حضور غلظت‌های مختلف نیکل (۰/۵، ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ ppm) در روز هشتم (OD = ۰/۸۳۲) و در غلظت ۱ ppm در روز یازدهم (OD = ۰/۸۳۲) بوده است.

مطابق نتایج به‌دست آمده، بیشترین میزان رشد در غلظت ۰/۵ ppm در روز هشتم (OD = ۰/۸۳۲) و در غلظت ۱ ppm در روز یازدهم (OD = ۰/۸۳۲) بوده است.

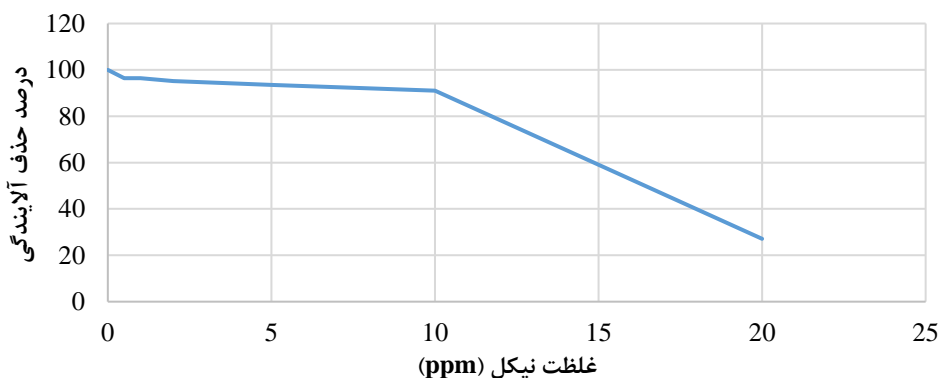
۳-۴ بررسی درصد حذف نیکل در غلظت‌های مختلف

درصد حذف آلاینده‌ها در غلظت‌های متفاوت نیکل در مقایسه با نمونه شاهد بررسی و نتایج در جدول ۱ آورده شده است. درصد حذف آلاینده نیکل توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در حضور غلظت‌های مختلف نیکل (۰/۵، ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ ppm) با نمونه شاهد مقایسه شده، در نمونه شاهد درصد حذف برابر با

صددرد بود و با افزوده شدن آلاینده، درصد حذف کاهش پیدا کرد. اما هم‌چنان تا غلظت ppm از فلز سنگین نیکل، درصد حذف آلاینده بیش از ۹۰ درصد گزارش شد. حتی در غلظت ۲۰ ppm نیز که غلظت بالایی برای فلز سنگین نیکل است جلبک به‌خوبی رشد کرده و توانست حذف آلاینده را داشته باشد. شکل ۴ برحسب اعداد به‌دست آمده از جدول ۱، نشان‌دهنده مقایسه بین درصد حذف آلاینده در غلظت‌های مختلف است. مطابق شکل ۳ با افزایش غلظت فلز نیکل به‌میزان ۲۰ ppm رشد جلبک به‌دلیل میزان بالای آلاینده‌ها کاهش یافته و در نتیجه راندمان جذب نیکل به‌میزان زیادی کاهش می‌یابد.

جدول ۱- درصد حذف نیکل در غلظت‌های مختلف نیکل

درصد حذف آلاینده	غلظت نیکل (ppm)
۱۰۰	۰
۹۶/۴	۰/۵
۹۶/۴	۱
۹۵/۱۳	۲
۹۳/۵	۵
۹۱/۰۷	۱۰
۲۷/۱۱	۲۰



شکل ۴- درصد حذف نیکل در حضور ریزجلبک در غلظت‌های مختلف نیکل

۳-۵- مدل‌سازی جذب زیستی نیکل

جذب در جدول ۲ آورده شده است. از نتایج جدول ۲، می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر ظرفیت جذب در غلظت‌های مختلف، مطابق جدول ۳ است.

مدل‌سازی فرآیند بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش است. در این مطالعه، ظرفیت جذب برحسب غلظت تعادلی، برای رسم نمودار جذب و لانگمویر استفاده شده است. تغییرات ظرفیت

جدول ۲- نتایج روزانه ظرفیت جذب ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در حضور غلظت‌های مختلف نیکل (برحسب ppm)

۲۰	۱۰	۵	۲	۱	۰/۵	غلظت تعادلی (Ce) (میلی‌گرم بر لیتر)
ظرفیت جذب (qe) (میلی‌گرم بر گرم)						روز
۲۲/۹۲	۱۴/۲۲	۸/۹۱	۵/۷۲	۴/۲۶	۳/۷۳	۱
۲۳/۸۵	۱۴/۹۹	۹/۴۴	۵/۸۷	۴/۷۲	۳/۹۴	۲
۲۴/۰۹	۱۵/۵۶	۹/۶۱	۵/۹۹	۴/۷۹	۴/۱۲	۳
۲۵/۷۶	۱۵/۷۴	۹/۸۶	۶/۱۲	۴/۸۷	۴/۲	۴
۲۳/۰۸	۱۶/۶۲	۱۰/۱۵	۶/۲۷	۴/۹۴	۴	۵
۲۲/۷۱	۱۶/۹۷	۱۰/۷۴	۶/۴	۵/۰۱	۳/۹	۶
۲۱/۷۸	۱۷/۵۳	۱۱/۰۲	۶/۷۶	۵/۰۹	۳/۷۴	۷
۲۰/۱۴	۱۸/۳۲	۱۱/۵۶	۶/۹۸	۵/۱۴	۳/۷	۸
۱۹	۱۷/۴۳	۱۱/۱۳	۶/۶۳	۵/۱۱	۳/۳۶	۹
۱۷/۹۴	۱۷	۱۰/۵۸	۶/۳۹	۵/۰۷	۳/۳	۱۰
۱۶/۹۹	۱۶/۶۹	۱۰/۵	۶/۰۸	۵/۰۳	۳/۲۷	۱۱
۱۶/۴۶	۱۶/۴۵	۱۰/۴۳	۵/۹۷	۵/۰۱	۳/۲	۱۲
۱۶/۱۸	۱۵/۹۸	۱۰/۱۹	۵/۷۷	۴/۸۳	۳/۱۱	۱۳
۱۵/۸۱	۱۵/۶۲	۹/۷۴	۵/۴۹	۴/۵۸	۳/۰۲	۱۴
۱۵/۳	۱۵/۲۱	۹/۲۴	۵/۲۷	۴/۴۹	۲/۹۱	۱۵
۱۵/۱۲	۱۴/۹۶	۸/۹۲	۵/۱۲	۴/۳۴	۲/۷	۱۶

جدول ۳- حداکثر ظرفیت جذب ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در حضور غلظت‌های مختلف نیکل (برحسب ppm)

حد اکثر ظرفیت جذب q_{max} (میلی‌گرم بر گرم)	غلظت آلاینده در حالت تعادل C_e (میلی‌گرم بر لیتر)
۴/۲	۰/۵
۵/۱۴	۱
۶/۹۸	۲
۱۱/۵۶	۵
۱۸/۳۲	۱۰
۲۵/۷۶	۲۰

۰/۲۰۱ لیتر بر میلی‌گرم به‌دست آمد. پارامترهای ایزوترم لانگمویر برای جذب نیکل توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در جداول ۴ و ۵ آورده شده است.

با توجه به نتایج جداول ۴ و ۵ و با کمک رابطه (۱)، نمودار ایزوترم لانگمویر برای جذب نیکل توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس به‌دست آمده و ترسیم شد (شکل ۵). نتایج نشان می‌دهند که ایزوترم لانگمویر برای فلز نیکل، می‌تواند داده‌های تجربی حاصل از آزمایش را برازش کند.

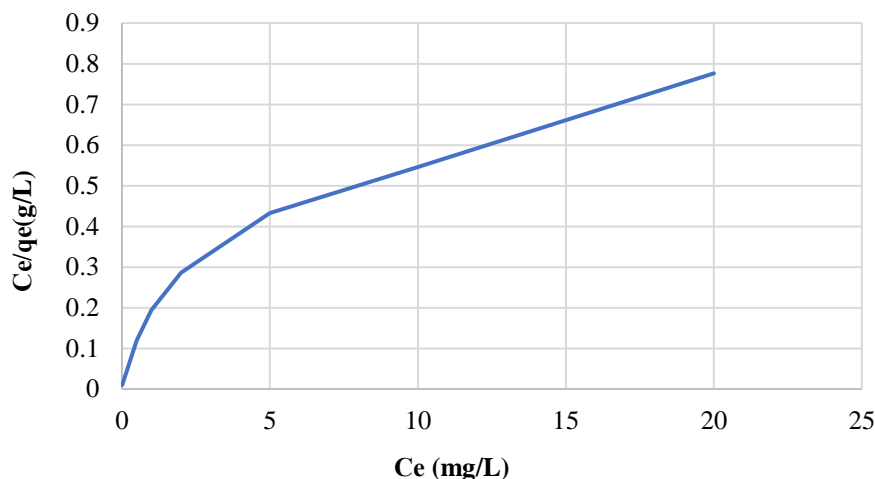
همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، با افزایش غلظت، ظرفیت جذب افزایش یافته و این سیر به‌صورت صعودی است. چنان‌که در غلظت ppm ۰/۵، حداکثر ظرفیت جذب ۴/۲ میلی‌گرم بر گرم بود. اما با افزایش غلظت این عدد سیر صعودی را طی کرده و در غلظت ppm ۲۰، به‌میزان ۲۵/۷۶ میلی‌گرم بر گرم رسید. با استفاده از نتایج به‌دست آمده از این مطالعه و معادله لانگمویر، ثابت‌های حاصل از تطبیق داده‌های تجربی بر ایزوترم تعادلی، R^2 (ضریب همبستگی) برابر با ۰/۹۹ و ضریب b، برابر با

جدول ۴- پارامترهای ایزوترم لانگمویر برای جذب نیکل توسط ریزجلبک سندسموس آلبیکوس

مقادیر به دست آمده	پارامترهای ایزوترم لانگمویر
(mg/g) ۲۵/۷۶	حداکثر ظرفیت جذب (q _m)
(L/mg) ۰/۲۰۱	ضریب (b)
۰/۹۹	ضریب همبستگی (R ²)

جدول ۵- پارامترهای غلظت Ce و غلظت بر میزان جذب Ce/qe ایزوترم لانگمویر برای جذب نیکل توسط ریزجلبک سندسموس آلبیکوس

Ce/qe (g/L)	Ce (mg/L)
۰/۰۱	۰/۰۱
۰/۱۱۹۰۴۸	۰/۵
۰/۱۹۴۱۷۵	۱
۰/۲۸۶۵۳۳	۲
۰/۴۳۲۵۲۶	۵
۰/۵۴۵۸۵۲	۱۰
۰/۷۷۶۳۹۸	۲۰



شکل ۵- ایزوترم لانگمویر برای جذب نیکل توسط ریزجلبک سندسموس آلبیکوس

۴- بحث و نتیجه گیری

شرایط کنترل شده میزان جذب آلاینده در دماهای مختلف (۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد) بررسی شد و دمای بهینه رشد ریزجلبک سندسموس آلبیکوس در حضور نیکل با غلظت ۱۰، ۳۰ ppm درجه سانتی‌گراد معین شد. بررسی درجه حرارت در تغییرات جذب مشخص کرد که با افزایش دما بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد، جذب کاهش می‌یابد که می‌تواند نشان از گرمازا بودن فرایند جذب باشد. دلیل کاهش جذب هم می‌تواند تمایل یون‌های فلزی برای فرار از سطح جاذب در نتیجه افزایش درجه حرارت از یک حرارت خاص (در این پژوهش ۳۰ درجه سانتی‌گراد) به بعد باشد. به‌طور کلی بهینه دمای رشد ریزجلبک سندسموس آلبیکوس بین ۲۷ الی ۳۰ درجه سانتی‌گراد است (Hodaifa et al., 2010). دمای بهینه رشد ریزجلبک‌ها و جذب زیستی آن‌ها تابع نوع گونه و نوع فلز سنگین بوده و گونه‌های

در مطالعه حاضر جذب زیستی فلز سنگین نیکل توسط ریزجلبک سندسموس آلبیکوس از محلول‌های آبی مورد مطالعه قرار گرفت که از مقایسه نتایج به دست آمده از این مطالعه با سایر مطالعات، می‌توان نتیجه گرفت که ریزجلبک سندسموس آلبیکوس، توانایی بالایی در حذف فلز سنگین نیکل به‌روش جذب زیستی دارد. متغیرهای بررسی شده در این مطالعه، دما، مدت زمان تماس محلول فلز نیکل با ریزجلبک سندسموس آلبیکوس و مقدار غلظت اولیه محلول فلز نیکل بودند. با بررسی تأثیر درجه حرارت در سایر پژوهش‌ها به‌نظر می‌رسد که درجه حرارت بهینه با توجه به نوع جلبک و یون فلز سنگین آلاینده متفاوت است. از آنجایی‌که درجه حرارت تأثیر اثربخشی بر رشد جلبک دارد. لذا ابتدا در طی

ظرفیت جذب یون‌های فلزی توسط توده زنده شود (Baldrian, 2003; Selatnia et al., 2004).

Guibal et al. (1992) بیان کردند که افزایش جذب یون‌های فلزی همزمان با فزونی غلظت اولیه آن‌ها، نتیجه افزایش فعل و انفعالات الکترواستاتیک برای قرارگیری یون‌های فلزی است. جذب سطحی فلزات وابسته به پروتونه شدن گروه‌های عاملی مانند کربوکسیلیک، فسفات و آمین در دیواره سلولی است (Fourest and Volesky, 1997). تغییرات ظرفیت جذب با توجه به تجمع بالای سلولی در غلظت‌های بالای توده زنده و کاهش مکان‌های فعال برای جذب فلزات سنگین قابل توضیح خواهد بود (Selatnia et al., 2004).

مطالعات نشان می‌دهند مدل نمودار جذب اکثر ریز جلبک‌ها از ایزوترم لانگمویر تبعیت کرده که نشان می‌دهد جذب به‌وسیله مکان‌های همگن مخصوص که درون ساختار جاذب وجود دارد صورت گرفته و هریک از این مکان‌ها تنها قابلیت جذب یک ردیف مولکول را دارند و در صورت ورود مولکول دیگر هیچ‌گونه تغییری در آن مکان که قبلاً عمل جذب زیستی در آن صورت گرفته رخ نمی‌دهد. لذا می‌توان گفت فرآیند جذب به‌صورت تک لایه انجام می‌شود (Edris et al., 2014; Zhou et al., 2014).

به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده از عملکرد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در رشد و حذف نیکل در مطالعه حاضر حاکی از پتانسیل مناسب این ریزجلبک برای برآوردن اهداف محیط‌زیستی است. از مقایسه نتایج تحقیقات فوق و مطالعه حاضر، می‌توان نتیجه گرفت که ریزجلبک زنده سندسموس آبلیکوس در حذف نیکل، مؤثر بوده و راندمان حذف بالایی دارد. برای حصول نتایج کامل‌تر، در ادامه مطالعات بیشتری می‌تواند بر مبنای جذب زیستی پساب‌های صنعتی دارای کاتیون‌ها و آنیون‌های فلزی مختلف توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس و نیز تاثیر پارامتر pH بر میزان جذب زیستی ریز جلبک انجام شود.

۵- پی‌نوشت‌ها

- 1- Part Per Million
- 2- Heavy Metals
- 3- Ion Exchange
- 4- Salt Precipitation
- 5- Bio sorption
- 6- Micro algae
- 7- Batch System
- 8- Continuous System
- 9- Chlorella
- 10- Scenedesmus obliquus
- 11- Optical Density
- 12- Langmuir

مختلف ریز جلبک‌ها، دماهای رشد متفاوتی دارند. Malakootian et al. (2011) در جذب کادمیوم به وسیله‌ی جلبک سبز *Ulothrix Zonata* دمای بهینه را ۲۵ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند. در پژوهشی دیگر بر روی جلبک سبز *Caulerpa lentillifera* بهترین دمای جذب یون فلزی سنگین ۲۱ درجه سانتی‌گراد گزارش شد (Apiratikul and Pavasant, 2008).

در ادامه تحت شرایط ثابت و درجه حرارت بهینه به‌دست آمده از مرحله اول آزمایش و $pH = 7 \pm 0.1$ ، در حضور غلظت‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ ppm فلز نیکل در طول زمان ۱، ۷، ۱۴ و ۲۱ روز میزان جذب و رشد جلبک، مورد بررسی قرار گرفت و نمونه‌های هم به‌عنوان شاهد در طول آزمایش در نظر گرفته شد. نهایتاً مشخص شد که به‌طور کلی ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در حضور غلظت‌های پایین‌تر از ۲۰ ppm نیکل، رشد خوبی داشته و جذب آلاینده‌ی بالایی را دارد. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که سندسموس کوادریا نیز جذب نیکل نسبتاً خوبی دارد (Awasthi and Rai, 2004). مطالعات و مشاهداتی نیز در گذشته بر روی جذب فلزات سنگین مس و کادمیوم توسط جلبک‌ها انجام شده و در این زمینه نتایج حذف خوبی توسط جلبک‌ها، گزارش شده‌است (Terry and Stone, 2002; Yan and Pan, 2002). Chong et al. (2000) با بررسی میزان جذب نیکل توسط سندسموس، میزان حذف این فلز را در حد ۹۷ درصد گزارش کرده‌اند.

Monteiro et al. (2009) در مطالعات خود از ریزجلبک زنده سندسموس آبلیکوس برای حذف کاتیون‌های کادمیوم در محلول‌های آبی استفاده کرده و بیشترین ظرفیت جذب را ۱۱/۴ میلی‌گرم کادمیوم بر گرم ریزجلبک در غلظت ۱ میلی‌گرم کادمیوم در لیتر، به‌دست آوردند.

گزارش شده‌است که حذف فلزات سنگین توسط ریزجلبک‌ها شامل ۲ مرحله است (Aksu et al., 1992; Roy et al., 1993). مرحله اول جذب زیستی است که بسیار سریع و به‌صورت فیزیکی یا شیمیایی اتفاق می‌افتد. این جذب زیستی می‌تواند هم در سلول‌های مرده 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, 1999). 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

- Engineering*, 39(1), 87-93.
- Fourest, E., and Volesky, B., (1997), "Alginate properties and heavy metal biosorption by marine algae", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 67(3), 215-226.
- Fu, F., and Wang, Q., (2011), "Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review", *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407-418.
- Gris, B., Morosinotto, T., Giacometti, G.M., Bertucco, A., and Sforza, E., (2014), "Cultivation of *Scenedesmus obliquus* in photobioreactors: effects of light intensities and light-dark cycles on growth, productivity, and biochemical composition", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 172(5), 2377-2389.
- Guibal, E., Roulph, C., and Le Cloirec, P., (1992), "Uranium biosorption by a filamentous fungus *Mucor miehei* pH effect on mechanisms and performances of uptake", *Water Research*, 26(8), 1139-1145.
- Gupta, V., and Rastogi, A., (2008), "Biosorption of lead from aqueous solutions by green algae *Spirogyra* species: kinetics and equilibrium studies", *Journal of Hazardous Materials*, 152(1), 407-414.
- Hodaifa, G., Martínez, M.E., and Sánchez, S., (2010), "Influence of temperature on growth of *Scenedesmus obliquus* in diluted olive mill wastewater as culture medium", *Engineering in Life Sciences*, 10(3), 257-264.
- Incharoensakdi, A., and Kitjahn, P., (2002), "Zinc biosorption from aqueous solution by a halotolerant cyanobacterium *Aphanothece halophytica*", *Current Microbiology*, 45(4), 261-264.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B.B., and Beeregowda, K.N., (2014), "Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals", *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60-72.
- Järup, L., (2003), "Hazards of heavy metal contamination", *British Medical Bulletin*, 68(1), 167-182.
- Khummongkol, D., Canterford, G., and Fryer, C., (1982), "Accumulation of heavy metals in unicellular algae", *Biotechnology and Bioengineering*, 24(12), 2643-2660.
- Kumar, S., and Trivedi, A., (2016), "A review on role of nickel in the biological system", *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 5(3), 719-727.
- 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.
- Malakootian, M., Toolabi, A., Moussavi, S.G., and Ahmadian, M., (2011), "Equilibrium and kinetic modeling of heavy metals biosorption from three different real industrial wastewaters onto *Ulothrix Zonata* algae", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(12), 1030-1037.
- Monteiro, C.M., Castro, P.M., and Malcata, F.X., (2009), "Use of the microalga *Scenedesmus obliquus* to remove cadmium cations from aqueous solutions", *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25(9), 1573-1578.
- Monteiro, C.M., Castro, P.M., and Malcata, F.X., (2011), Ahluwalia, S.S., and Goyal, D., (2007), "Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater", *Bioresource Technology*, 98(12), 2243-2257.
- Aksu, Z., Sag, Y., and Kutsal, T., (1992), "The biosorption of copper by *C. vulgaris* and *Z. ramigera*", *Environmental Technology*, 13(6), 579-586.
- Alkorta, I., Hernández-Allica, J., Becerril, J., 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.
- Apiratikul, R., and Pavasant, P., (2008), "Batch and column studies of biosorption of heavy metals by *Caulerpa lentillifera*", *Bioresource Technology*, 99(8), 2766-2777.
- Awasthi, M., and Rai, L., (2004), "Adsorption of nickel, zinc and cadmium by immobilized green algae and cyanobacteria: a comparative study", *Annals of Microbiology*, 54, 257-268.
- Baldrian, P., (2003), "Interactions of heavy metals with white-rot fungi", *Enzyme and Microbial Technology*, 32(1), 78-91.
- Bayramoğlu, G., and Arica, M.Y., (2008), "Adsorption of Cr (VI) onto PEI immobilized acrylate-based magnetic beads: isotherms, kinetics and thermodynamics study", *Chemical Engineering Journal*, 139(1), 20-28.
- Blewett, T.A., and Leonard, E.M., (2017), "Mechanisms of nickel toxicity to fish and invertebrates in marine and estuarine waters", *Environmental Pollution*, 223, 311-322.
- Brinza, L., Dring, M.J., and Gavrilescu, M., (2007), "Marine micro and macro algal species as biosorbents for heavy metals", *Environmental Engineering and Management Journal (EEMJ)*, 6(3), 237-251.
- Brzóska, M., and Moniuszko-Jakoniuk, J., (2001), "Interactions between cadmium and zinc in the organism", *Food and Chemical Toxicology*, 39(10), 967-980.
- Çelekli, A., Balcı, M., and Bozkurt, H., (2008), "Modelling of *Scenedesmus obliquus*; function of nutrients with modified Gompertz model", *Bioresource Technology*, 99(18), 8742-8747.
- 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.
- Chong, A., Wong, Y., and Tam, N., (2000), "Performance of different microalgal species in removing nickel and zinc from industrial wastewater", *Chemosphere*, 41(1-2), 251-257.
- Edris, G., Alhamed, Y., and Alzahrani, A., (2014), "Biosorption of cadmium and lead from aqueous solutions by *Chlorella vulgaris* biomass: Equilibrium and kinetic study", *Arabian Journal for Science and*

- "Biosorption of zinc ions from aqueous solution by the microalga *Scenedesmus obliquus*", *Environmental Chemistry Letters*, 9(2), 169-176.
- Monteiro, C.M., Castro, P.M., and Malcata, F.X., (2012), "Metal uptake by microalgae: underlying mechanisms and practical applications", *Biotechnology Progress*, 28(2), 299-311.
- Pena-Castro, J., Martinez-Jerónimo, F., Esparza-Garcia, F., and Canizares-Villanueva, R., (2004), "Heavy metals removal by the microalga *Scenedesmus incrassatulus* in continuous cultures", *Bioresource Technology*, 94(2), 219-222.
- Perales-Vela, H.V., Pena-Castro, J.M., and Canizares-Villanueva, R.O., (2006), "Heavy metal detoxification in eukaryotic microalgae", *Chemosphere*, 64(1), 1-10.
- Radway, J.C., Wilde, E.W., Whitaker, M.J., and Weissman, J.C., (2001), "Screening of algal strains for metal removal capabilities", *Journal of Applied Phycology*, 13(5), 451-455.
- Roy, D., Greenlaw, P.N., and Shane, B.S., (1993), "Adsorption of heavy metals by green algae and ground rice hulls", *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 28(1), 37-50.
- Selatnia, A., Madani, A., Bakhti, M., Kertous, L., Mansouri, Y., and Yous, R., (2004), "Biosorption of Ni²⁺ from aqueous solution by a NaOH-treated bacterial dead *Streptomyces rimosus* biomass", *Minerals Engineering*, 17(7-8), 903-911.
- Terry, P.A., and Stone, W., (2002), "Biosorption of cadmium and copper contaminated water by *Scenedesmus abundans*", *Chemosphere*, 47(3), 249-255.
- Wang, J., and Chen, C., (2006), "Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: A review", *Biotechnology Advances*, 24(5), 427-451.
- Wilde, E.W., and Benemann, J.R., (1993), "Bio-removal of heavy metals by the use of microalgae", *Biotechnology Advances*, 11(4), 781-812.
- Yan, H., and Pan, G., (2002), "Toxicity and bioaccumulation of copper in three green microalgal species", *Chemosphere*, 49(5), 471-476.
- Zdrojewicz, Z., Popowicz, E., and Winiarski, J., (2016), "Nickel-role in human organism and toxic effects", *Polski Merkuriusz Lekarski: Organ Polskiego Towarzystwa Lekarskiego*, 41(242), 115-118.
- Zhou, W., Chen, P., Min, M., Ma, X., Wang, J., Griffith, R., Hussain, F., Peng, P., Xie, Q., and Li, Y., (2014), "Environment-enhancing algal biofuel production using wastewaters", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 256-269.



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