

عملکرد زیست توده مرده جلبک فوکوس سراتوس برای جذب زیستی همزمان کادمیوم و نیکل از محیط آبی

سلمان احمدی اسبچین* و ناصر جعفری

دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲۵ / پذیرش: ۱۳۹۲/۹/۲۴

گروه زیست شناسی سلولی و مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر

*مسئول مکاتبات: sa.ahmadi@umz.ac.ir

چکیده. روش های فیزیکی و شیمیایی جذب فلزات سنگین معایبی از جمله هزینه زیاد و غیرمؤثر بودن در غلظت های کم دارد. روش های زیستی جذب فلزات سنگین در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفت. از میان جاذب های زیستی شامل باکتری ها، قارچ ها و جلبک ها، جلبک ها بالاترین توانایی را در جذب فلز دارند. در این تحقیق مشخص شد که نقش اصلی در جذب همزمان فلزات نیکل و کادمیوم برعهده اسید آلژینیک است. جلبک قهوه ای فوکوس سراتوس به عنوان جاذب زیستی مقرون به صرفه در این تحقیق استفاده شده و جذب زیستی همزمان یون کادمیوم و نیکل در راکتور بسته مطالعه شد. ساختار سطحی جلبک و کیتیک جلبک فلزات بررسی شده است. زمان تعادل حدود ۳۰۰ دقیقه بود. ایزوترم جذب با استفاده از معادله لانگمویر تفسیر شد. بیشینه جذب برای فلزات کادمیوم و نیکل به ترتیب حدود ۰/۸۵ و ۰/۹۵ میلی مول بر گرم بود.

واژه های کلیدی. جلبک، کادمیوم، نیکل، اسید آلژینیک، جذب زیستی

Performance of dead *Fucus serratus* biomass in binary biosorption of Cd (II) and Ni (II) from aquatic habitat

Salman Ahmady-Asbchin* and Naser Jafari

Received 16.03.2012 / Accepted 15.12.2013

Department of Cell and Molecular Biology, Faculty of Basic Science, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

* Correspondent author: sa.ahmadi@umz.ac.ir

Abstract. Methods of physical and chemical adsorption of heavy metals have disadvantages in some ways- such as high cost and ineffectiveness at low concentrations. In recent decades methods of biological uptake of heavy metals have been investigated. The biological adsorbents include bacteria, fungi and alga, among which algae have the highest efficiency of metal uptake. This study indicated that Alginate is most responsible for the uptake of metals, such as nickel (II) and cadmium (II). *Fucus serratus*, brown alga, used as a cost-effective adsorbent for the biological uptake of cadmium and nickel ions simultaneously in a batch reactor in this study. Surface structure of algae has also been investigated. Adsorption kinetics have been measured and the results have indicated that the equilibrium time is about 300 minutes. The adsorption isotherm was interpreted by means of the Langmuir equation. The maximum adsorption rate for cadmium (II) and nickel (II) turned out to be about 0.85 and 0.95 mmol/g, respectively.

Keywords. alga, cadmium, nickel, alginate, biosorption

مقدمه

فلزات سنگین، سمی ترین آلاینده ها در محیط زیست هستند که علاوه بر ایجاد برخی عوارض سوء نظیر حساسیت، بیماری، مسمومیت و مرگ انسان، وارد زنجیره غذایی می شوند و حتی جهش زایی و سرطان نیز ایجاد می کنند. این فلزات سنگین از منابع گوناگون مانند فرسایش طبیعی مواد، بارش های جوی، فوران های آتشفشانی، خاک، فاضلاب ها، دفن بهداشتی، شیرابه اماکن، معادن، روان آب های شهری و فاضلاب های صنعتی مختلف، شهری، کاغذ، الکترونیک، صنایع ذوب فلز، به خصوص آبکاری دباغی رنگرزی وارد محیط زیست می شوند.

یکی از مهم ترین و خطرناک ترین آلوده کننده های زیست محیطی، آلودگی های ناشی از یون های فلزات سنگین موجود در پساب های واحدهای صنعتی است. در بسیاری از کشورهای جهان سوم و همچنین کشورهای در حال توسعه کنترل مناسبی بر سیستم های خروجی پساب که وارد محیط زیست می شود صورت نمی گیرد و همین به آلودگی های حاد و مزمن جمعیت های زیستی اعم از گیاهی، حیوانی و انسانی منجر می شود (رخشانی، ۱۳۸۴). به دلیل کارآلودگی و مقرون به صرفه نبودن بسیاری از روش های فیزیکی و شیمیایی برای حذف یون های فلزی از پساب ها، معرفی و استفاده از روش های ساده، ارزان و کارآمد برای حذف یون های فلزی ضروری است (Spain, 2003; Fillai, 2000). نیکل علاوه بر آسیب به ریه، حفره های بینی و سینوس باعث سوزش و خارش پوست و التهاب نیز می شود. عموماً فلز نیکل و ترکیبات آن سرطان زا هستند (Browning, 1986). جذب فلز توسط میکروارگانیسم ها می تواند با سیستم های مرده تحت عنوان جذب بیولوژیکی یا زنده تحت عنوان تجمع بیولوژیکی صورت بگیرد. مطالعات امکان سنجی برای کارهایی با مقیاس بزرگ نشان

می دهند که فرآیندهای جذب بیولوژیکی کارآتر از فرایندهای تجمع بیولوژیکی اند (Strerberg, 2000). سازوکار بانداشدگی فلزات به علت پیچیدگی جرم بیولوژیکی به آسانی قابل تصور نیست، بنابراین محل تجمع فلزات توسط میکروسکوپ الکترونی و اشعه ایکس و تحلیل دیگر مشخص می شود. سازوکار جذب اصولاً شامل کمپلکس با سطح سلول، تعویض یونی و رسوب های ریز است (Diniz, 2008; Wass, 1997).

ظرفیت جذب جاذب های بیولوژیکی مختلف به دلیل تفاوت این جاذب ها در جذب فلزات سنگین متفاوت است. کارآیی جاذب بیولوژیکی به حالت یونی میکروارگانیسم وابسته است و این جاذب باید همانند رزین های سنتتیک با فرم های متفاوت یونی مثل حالت پروتونی (H^+) یا کاتیونی (سدیم، کلسیم و منیزیم) اشباع شوند. به همین دلیل با توجه به نوع میکروارگانیسم و فلز سنگین به کمک اسیدهای معدنی، باز یا نمک املاح اولیه بر روی جرم بیولوژیکی انجام می شود. از دیگر عوامل مؤثر در پدیده جذب نقش گروه های مختلف جرم بیولوژیکی در حذف و بازیافت فلزات سنگین توسط پدیده جذب است؛ چراکه جرم های بیولوژیکی مختلف همچون باکتری ها، قارچ ها، مخمرها، سیانوباکتری ها و جلبک ها می توانند انواع گوناگونی از فلزات سنگین با مقادیر مختلف را جذب کنند (Volesky, 1990). جذب زیستی فلزات سنگین، تکنولوژی نسبتاً جدیدی برای تصفیه پساب های صنعتی است و هدف آن حذف فلزات سمی و پاک سازی محیط زیست و نیز بازیافت فلزات با ارزش است. از مزایای مهم تکنولوژی جذب زیستی، می توان به مؤثر بودن آن در کاهش غلظت یون های فلز سنگین به مقادیر بسیار پایین، قابلیت تولید مجدد جاذب، عدم تولید لجن، بازیافت فلز و استفاده از جاذب زیستی ارزان مثل جلبک

فلزات سنگین، سمی ترین آلاینده ها در محیط زیست هستند که علاوه بر ایجاد برخی عوارض سوء نظیر حساسیت، بیماری، مسمومیت و مرگ انسان، وارد زنجیره غذایی می شوند و حتی جهش زایی و سرطان نیز ایجاد می کنند. این فلزات سنگین از منابع گوناگون مانند فرسایش طبیعی مواد، بارش های جوی، فوران های آتشفشانی، خاک، فاضلاب ها، دفن بهداشتی، شیرابه اماکن، معادن، روان آب های شهری و فاضلاب های صنعتی مختلف، شهری، کاغذ، الکترونیک، صنایع ذوب فلز، به خصوص آبکاری دباغی رنگرزی وارد محیط زیست می شوند.

یکی از مهم ترین و خطرناک ترین آلوده کننده های زیست محیطی، آلودگی های ناشی از یون های فلزات سنگین موجود در پساب های واحدهای صنعتی است. در بسیاری از کشورهای جهان سوم و همچنین کشورهای در حال توسعه کنترل مناسبی بر سیستم های خروجی پساب که وارد محیط زیست می شود صورت نمی گیرد و همین به آلودگی های حاد و مزمن جمعیت های زیستی اعم از گیاهی، حیوانی و انسانی منجر می شود (رخشانی، ۱۳۸۴). به دلیل کارآلودگی و مقرون به صرفه نبودن بسیاری از روش های فیزیکی و شیمیایی برای حذف یون های فلزی از پساب ها، معرفی و استفاده از روش های ساده، ارزان و کارآمد برای حذف یون های فلزی ضروری است (Spain, 2003; Fillai, 2000). نیکل علاوه بر آسیب به ریه، حفره های بینی و سینوس باعث سوزش و خارش پوست و التهاب نیز می شود. عموماً فلز نیکل و ترکیبات آن سرطان زا هستند (Browning, 1986). جذب فلز توسط میکروارگانیسم ها می تواند با سیستم های مرده تحت عنوان جذب بیولوژیکی یا زنده تحت عنوان تجمع بیولوژیکی صورت بگیرد. مطالعات امکان سنجی برای کارهایی با مقیاس بزرگ نشان

کادمیوم واکنش نشان دهد (Xie, 2007). با توجه به توسعه صنعت در کشور و تخلیه فاضلاب های حاوی فلزات سنگین از جمله کادمیوم و نیکل تحقیقات در زمینه بیوتکنولوژی جذب فلز لازم است. فقدان تحقیق درباره جذب زیستی و بازیافت دو فلز مذکور به صورت همزمان توسط جلبک قهوه ای فوکوس سراتوس در داخل کشور، این مطالعه تحقیقاتی با هدف توسعه تکنولوژی زیستی جدید برای حذف و بازیافت این دو فلز توسط این جلبک قهوه ای از محلول های آبی به صورت بیومس غیرفعال و تأثیر پارامترهای مختلف بر حذف آنها به صورت مطالعات سینتیکی و ایزوترم انجام گرفته است. همان گونه که در جدول شماره ۱ نشان داده شد، نسبت میزان مانورونیک اسید و گلوکورونیک اسید در جذب فلزات به وسیله جلبک مهم است. در فوکوس سراتوس این نسبت ۱ است.

طبیعی، که فراوان یافت می شود، اشاره کرد (Herrero, 2006)

جلبک ها به علت داشتن توانایی لازم برای ایجاد توده ضخیم در میان اتوتروف ها مورد توجه قرار گرفته اند. در دهه اخیر به بررسی و یافتن جاذب های کم هزینه پرداخته شده است، اما جلبک قهوه ای جاذبی بسیار خوب و مفید مطرح شده است. علت جذب این جلبک خصوصیت دیواره سلولی آن است که اسید آلژینیک و اسید فوکوئیدان دارد و غالباً مسئول چلاته کردن فلزات سنگین است. اسید آلژینیک در pH خنثی سایت های آنیونی کربوکسیلات و سولفات ایجاد می کند. فرم های آب شرب این جلبک ها دارای اسید گالاکتورونیک و پلیمریکتین است که سایت های آنیونی دارند و توسط جذب الکترواستاتیک فلزات به آنها باند می شوند (Hollan, 1994).

حضور آلژینیک اسید در دیواره جلب، برای اتصال فلز اساسی و مهم است. گروه های کربوکسیل سطح آلژینیک اسید می تواند با فلزات کاتیونی مانند نیکل و

جدول ۱- میزان نسبت مانورونیک اسید و گلوکورونیک اسید در آلژینیک اسید جلبک ها.

Table 1. Ratio amount of mannuronic acid, glucuronic acid and alginic acid in algae.

میزان نسبت M/G	نوع جلبک
۱/۶	<i>Macrocystis pyrifera</i> (L.) C. Agardh
۰/۴۵	<i>Laminaria hyperborea</i> (Gunnerus) Foslie
۱/۲	<i>Laminaria digitata</i> (Hudson) J.V. Lamouroux
۲/۲	<i>Laminaria japonica</i> J.E. Areshoug
۱/۲	<i>Ascophyllum nodosum</i> (L.) Le Jolis
۱/۰	<i>Fucus serratus</i> L.
۰/۱۹	<i>Sargassum fluitans</i> Borgesen
۰/۷۲	<i>Sargassum siliquosum</i> J. Agah

مکانیسم جذب میزان فلزات جذب شده در سطح جلبک برابر میزان فلز خارج شده از سطح جلبک است.

علاوه بر این میزان ترکیبات موجود در فوکوس سراتوس در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. با توجه به

جدول ۲- فهرست عناصر موجود در جلبک قهوه‌ای فوکوس سراتوس.

Table 2. The composition of brown algae *Fucus serratus*.

عناصر	فوکوس سراتوس قطر ۰/۵ میلی‌متر
C (%)	۴۰/۰
N (%)	۲/۰
H (%)	۵/۰
O (%)	۴۱/۵
S (%)	۰/۵

استفاده می‌شود. در این مطالعه از مدل‌های شبه‌درجه یک و شبه‌درجه دو برای مدل‌سازی اطلاعات تجربی استفاده می‌شود.

معادله شبه‌درجه یک لاگرانژ به این صورت است:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (1)$$

که در آن، K_1 ثابت سرعت جذب بیولوژیکی برحسب min^{-1} و q_e و q_t به ترتیب میزان جذب فلز در زمان تعادل و زمان t ، برحسب میلی مول بر گرم است. با لگاریتم‌گیری از رابطه فوق معادله زیر را می‌توان بازنویسی کرد:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1 a d t}{2.303} \quad (2)$$

در معادله شبه‌درجه یک، شدت پرشدن سایت‌های جاذب متناسب با تعداد سایت‌های خالی در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای k_1 و q_{eq} با استفاده از رسم نمودار خطی $\log(q_{eq} - q_t)$ برحسب t به دست می‌آیند. معادله شبه‌درجه دو براساس میزان ظرفیت تعادلی است و در آن شدت پر شدن سایت‌های جاذب متناسب با مربع تعداد سایت‌های خالی جاذب فرض می‌شود.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی جلبک‌ها و فراوری شیمیایی

جلبک قهوه‌ای فوکوس سراتوس از ساحل اقیانوس اطلس در شهر پورنیسک فرانسه جمع‌آوری شد. این جلبک دوبار با آب آشامیدنی، سپس دوبار با آب مقطر شست شو شد و برای خشک شدن در معرض نور آفتاب قرار گرفت و در نهایت با برش دادن، قطعاتی با قطر ۰/۵ میلی‌متر انتخاب و استفاده شد.

آزمایش‌های سینتیک جذب

آزمایش‌های مربوط به سینتیک جذب هم‌زمان کادمیوم و نیکل به وسیله جلبک فوکوس سراتوس در یک راکتور یک لیتری با افزودن یک گرم جلبک انجام گرفت. در این آزمایش‌ها از اسید کلریدریک و هیدروکسید سدیم برای تنظیم pH استفاده شد.

پارامترهای سینتیک جذب زیستی

به منظور تحقیق درباره سازوکار جذب بیولوژیکی و مشخص کردن مرحله کنترل‌کننده عمل جذب نظیر انتقال یا مرحله واکنش شیمیایی، از مدل‌های سینتیک

معادله شبه درجه دوم به این صورت است:

$$\frac{d_{qt}}{dt} = K_2 (q_{eq} - q_t)^2 \quad (۳)$$

در این معادله K_2 ثابت سرعت واکنش درجه دوم برحسب $g/mg.min$ است. q_t و q_e همانند معادله شبه درجه اول هستند. با انتگرال گیری از معادله ۳، این رابطه به دست می آید.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (۴)$$

پارامترهای K_2 و q_{eq} با استفاده از رسم نمودار خطی t/q_t برحسب t به دست می آید (Chen, 2007; Smaidsrot, 1996).

پارامترهای تعادلی جذب زیستی

اطلاعات تعادلی تحت عنوان ایزوترم جذب برای طراحی سیستم ضروری است. در این تحقیق از ایزوترم لانگمویر برای مدل سازی تعادلی جذب کادمیوم و نیکل به صورت هم زمان توسط فوکوس سراتوس استفاده شده است.

اگر یون های فلزی به طور مستقل به سایت های جذب متصل شوند و جذب یون اول تأثیری بر جذب یون های دیگر نداشته باشد و جذب نیز به صورت تک لایه انجام شود، می توان از ایزوترم لانگمویر برای مدل سازی استفاده کرد و معادله به این صورت است:

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (۵)$$

Q_e میزان جذب یون فلزی در حالت تعادل (میلی گرم بر گرم)، C_e غلظت یون فلزی در حالت تعادل (میلی گرم بر لیتر)، q_m بالاترین مقدار یون فلزی بر واحد وزن جلبک برای تشکیل تک لایه کامل بر سطح جذب در بالاترین غلظت تعادلی یون فلزی و b ثابت لانگمویر مربوط به مقدار نیروی جاذبه بین سایت های قابل اتصال و یون های فلزی است و نشان دهنده غلظتی است که در آن مقدار $q_m/2$ از یون کادمیوم و نیکل با

جذب پیوند برقرار کرده است و هرچه مقدار b بالاتر باشد جاذبه بین جاذب و جذب شونده بیشتر است. Q_m در نشان دادن محدودیت های تجربی ظرفیت جذب، زمانی که سطح به طور کامل به وسیله یون فلزی پوشیده شده و مقایسه بازده جاذب به خصوص در مواردی که جاذب به حالت اشباع نمی رسد، کمک می کند. q_m و b را می توان با رسم نمودار خطی $1/Q_e$ برحسب $1/C_e$ مشخص کرد. پارامتر بدون بعد تعادل R تعریف می شود که نشان دهنده مطلوب بودن عمل جذب به وسیله یک جاذب است.

در مورد ایزوترم لانگمویر این فرضیه ها در نظر گرفته می شود: تعداد جایگاه های جذب ثابت است، تمامی جایگاه های جذب یکسان هستند، فقط یک ماده جذب شونده وجود دارد و در نهایت یک مولکول جذب شونده با یک جایگاه فعال واکنش می دهد. فرم خطی لانگمویر به این صورت است:

$$R = \frac{1}{1 + b C_0} \quad (۶)$$

بازیافت کادمیوم و نیکل و استفاده مجدد از بیوماس

در این مرحله، آزمایش های بازیافت کادمیوم و نیکل و احیای بیوماس غیرفعال جلبک قهوه ای فوکوس سراتوس به منظور کاربرد مجدد در سیکل جذب زیستی انجام شد. به منظور انجام عمل جذب کادمیوم و نیکل، پس از انجام سیکل جذب زیستی و گذشت زمان تعادل ۵ ساعت و صاف کردن محلول، جلبک روی صافی را با آب مقطر شست شو دادیم و در ۵۰ میلی لیتر اسید نیتریک ۰/۱ مولار قرار دادیم و به مدت زمان ۱۵ دقیقه عمل مخلوط کردن با استفاده از شیکر با سرعت rpm ۲۰۰ انجام گرفت. جهت عمل احیای بیوماس به منظور کاربرد مجدد آن در سیکل جذب زیستی، جلبک های روی صافی را، که فلز آن ها در مرحله قبل واجذب شده

دهد با تیمار جلبک به وسیله آب مقطر، قطر کانالها و سطح ویژه جلبک یعنی BET افزایش پیدا می کند و میزان جذب در زمانهای مختلف تفسیر می شود. علت افزایش آرام میزان جذب این است که با گذشت زمان منافذ باز می شوند و یونهای کادمیوم و نیکل می توانند وارد شیارها شوند. جذب اولیه مربوط به گروههای فعال سطحی جلبک است که در معرض مستقیم فلزات سمی قرار می گیرند و جذب اندک در زمانهای طولانی به اتصال این فلزات به گروههای سطحی مربوط است که قبلاً مخفی بوده اند؛ ولی اکنون آشکار شده اند (جدول ۳).

بودند، در ۵۰ میلی لیتر محلول کلرید کلسیم ۰/۱ مولار قرار دادیم و به مدت ۱۵ دقیقه عمل هم زنی با استفاده از شیکر با سرعت ۲۰۰ rpm انجام شد. در نهایت پس از اتمام این زمان، نمونه ها با استفاده از کاغذ صافی واتمن صاف شدند و از جلبکهای احیاشده روی صافی به منظور کاربرد مجدد در سیکل جذب زیستی استفاده شد.

نتایج

سطح جلبک فوکوس سراتوس ابتدا قبل از شست شو با آب مقطر و در مرحله بعد با تیمار جلبک توسط سوسپانسیون آب مقطر مشخص شد. بررسی نشان می -

جدول ۳- مقایسه خصوصیات ساختمانی جاذب زیستی (فوکوس سراتوس) قبل و بعد از تیمار با آب مقطر.

Table 3. The comparing the structural properties of biological adsorbent (*Fucus serratus*) before and after treatment with distilled water.

	فوکوس سراتوس خام	فوکوس سراتوس شسته شده
حجم کلی نفوذ	۰/۰۲۷ میلی لیتر بر گرم	۰/۰۸۱ میلی لیتر بر گرم
قطر حفره سطح جلبک	۵۹۴۲ نانومتر	۱۵۶۵۰ نانومتر
سطح BET	۰/۱۹ ± ۰/۰۳ مترمکعب بر گرم	۱/۷۹ ± ۰/۲۲ مترمکعب بر گرم

خواص سطحی ویژه

آزمایش های کینتیک

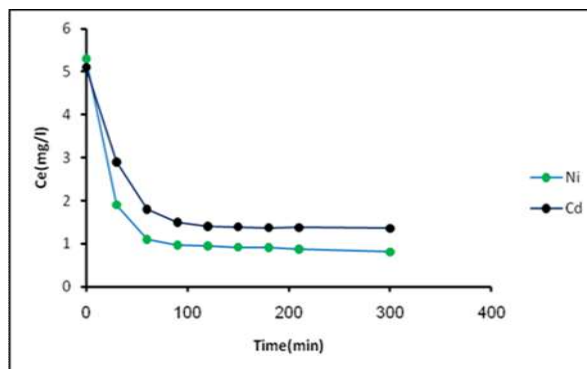
این زمان طولانی تر ولی در مقایسه با کیتوزان و کربن فعال این زمان کمتر است. همین آزمایش در آب معمولی انجام شد که منحنی متفاوتی به دست آمد. این تفاوت به حضور یونهای کلسیم در آب معمولی مربوط می شود که در اتصال به گیرنده های سطح سلول با فلز کادمیوم و نیکل رقابت می کنند. با مقایسه کینتیک جذب کادمیوم و نیکل در آب مقطر و آب شیر مشخص شد تفاوت این دو زیاد نیست و می توان در امور صنعتی

کینتیک کادمیوم و نیکل به وسیله بیوماس فوکوس سراتوس با استفاده از آب مقطر در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، pH در حدود ۵/۵ به دست آمده، که زمان تعادل آن در حدود ۳۴۰ دقیقه است. بعد از گذشت این زمان راندمان جذب ثابت می ماند. این مسئله در مصارف صنعتی مهم است، زیرا زمان تعادل در باکتری ها در حدود چند دقیقه، در جلبکها در حدود چند ساعت، در کیتوزان به میزان چند روز و برای کربن فعال در حدود چند هفته است. در نتیجه در مقایسه با باکتری ها

آزمایش های ایزوترم

از مهم ترین آزمایش ها در بحث جاذب های بیولوژیک آزمایش ایزوترم است. منحنی ایزوترم تثبیت کادمیوم و نیکل به صورت جدا و همچنین به صورت هم زمان انجام شده است.

از پساب و فاضلاب کارخانجات استفاده کرد. هم چنین با مطالعه منحنی مورد نظر به این نتیجه می رسیم که راندمان جذب نیکل در مقایسه با کادمیوم بیشتر است (شکل ۱).

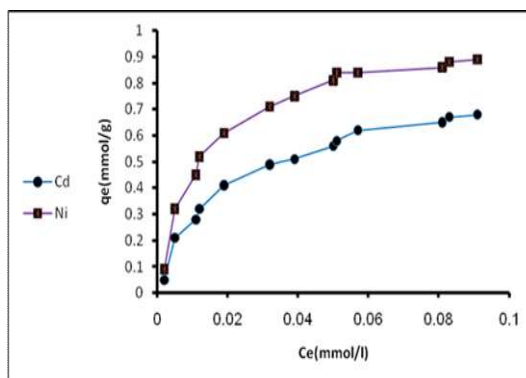


شکل ۱- کینتیک تثبیت یون کادمیوم و نیکل به وسیله جلبک در آب مقطر (غلظت اولیه کادمیوم و نیکل ۰/۱۳۵ میلی مول بر لیتر و غلظت جلبک ۰/۱ گرم بر لیتر).

Fig. 1. Kinetic adsorption of cadmium and nickel ions by the alga in the water (initial concentration of Cd and Ni 0.135 mmol/ L or algal concentration of 0.1 g/ L).

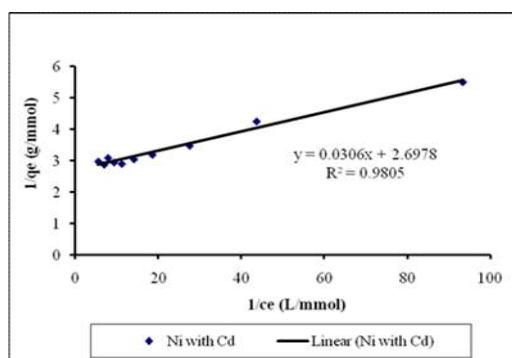
رقابت آن با یون های فلزی نیکل و کادمیوم، باعث کاهش جذب یون های فلزی تحت مطالعه شد. میزان جذب یون های نیکل و کادمیوم در آب معمولی نیز زیاد است. گفتنی است که منحنی ایزوترم جذب فلزات مطالعه شده در آب مقطر از معادله لانگمویر پیروی می کند (شکل ۲)، ولی میزان جذب این فلزات در آب معمولی از معادله فروندلیچ پیروی می کند. همچنین ایزوترم نیکل بر اساس معادله خطی لانگمویر در حضور کادمیوم در شکل ۳ آمده است.

این آزمایش ها در آب مقطر و آب معمولی توسط فوکوس سراتوس در محلول حاوی pH حدود 5 ± 0.2 انجام شده است و در اشکال ۲ و ۳ و جدول ۴ آمده است. بر اساس مدل لانگمویر برای تثبیت کادمیوم حداکثر جذب برابر ۰/۸۵ میلی مول بر گرم است و ماکزیمم میزان جذب یون نیکل ۰/۹۵ میلی مول بر گرم است؛ ولی این میزان در آب معمولی به ترتیب برای کادمیوم و نیکل ۰/۴۵ و ۰/۵۱ میلی مول بر گرم است. حضور ۴۷ میلی گرم بر لیتر از کلسیم در آب معمولی و



شکل ۲- ایزوترم تثبیت نیکل و کادمیوم در آب مقطر (میزان غلظت از ۰/۰۱۱ تا ۰/۳۸۷ میلی مول بر لیتر در آب مقطر و غلظت جلبک ۰/۱ میلی گرم بر لیتر).

Fig. 2. Isotherm of nickel and cadmium adsorption in distilled water (concentration of 0.011 to 0.387 mmol per liter in distilled water and algae concentration 0.1 mg).



شکل ۳- ایزوترم تثبیت نیکل در حضور یون کادمیوم در آب مقطر با استفاده از مدل خطی لانگمویر. (میزان غلظت از ۰/۰۱۱ تا ۰/۳۸۷ میلی مول بر لیتر در آب مقطر و غلظت جلبک ۰/۱ میلی گرم بر لیتر).

Fig. 3. Isotherm adsorption nickel cadmium ions in the presence of distilled water using a linear model Langmuir. (Concentration of 0.011 to 0.387 mmol per liter in distilled water and algae concentration 0.1 mg).

جدول ۴- پارامترهای لانگمویر در رابطه با ایزوترم جذب کادمیوم و نیکل توسط جلبک فوکوس سراتوس.

Table 4. Langmuir parameters related to the adsorption isotherm of cadmium and nickel by *Fucus serratus*.

r^2	q_m میلی مول بر گرم	b_L لیتر بر میلی مول	فلز
۰/۹۴۸	۰/۸۵۲	۲۴/۲۳	کادمیوم
۰/۹۹۰	۰/۹۴۶	۲۱/۴۴	نیکل

بحث و نتیجه گیری

شده، یون کلسیم و منیزیم و سدیم از سطح جلبک آزاد شود. اسید آلژینیک در سطح دیواره جلبک مورد نظر نقش اصلی را در جذب فلزات سمی کادمیوم و نیکل برعهده دارد. به جهت اینکه این جلبک فراوان و ارزان در طبیعت وجود دارد، استفاده از آن مقرون به صرفه است. نوع جذب در این جلبک از نوع غیروابسته به متابولیسم است. به دلیل کاربرد نمونه‌های حقیقی پساب کارخانجات در مصارف صنعتی و جذب بالای فلز نیکل و کادمیوم در آب معمولی توسط جلبک می‌توان از جلبک در صنعت استفاده کرد.

پساب حاوی فلزات سنگین از معضلات مهم کنونی است. در ده‌ساله اخیر از قارچ‌ها، مخمرها، جلبک‌ها و باکتری‌ها برای جذب فلزات سنگین و سمی استفاده شده است (Prasher, 2004). جذب فلزات تحت مطالعه به وسیله جلبک در مقایسه با دیگر جاذب‌های زیستی از کارایی بالاتری برخوردار است (جدول ۵). در این تحقیق از جلبک به جهت راندمان بالاتر نسبت به دیگر جاذب‌های زیستی استفاده شده است. در این تحقیق مشخص شد که به میزان کادمیوم و نیکل جذب

جدول ۵- مقایسه میزان جذب فلز کادمیوم و نیکل در جاذب‌های مختلف.

Table 5. Comparative uptake of cadmium and nickel in different biosorbents.

دفرنس	pH	فلز	بیشینه جذب (میلی مول بر گرم)	جاذب زیستی
(Hollan, 1994) (Romera, 2008) (Smaidsrot, 1996)	۳/۵ ۳/۵ ۳/۵	کادمیوم نیکل نیکل	۰/۶۵ ۰/۳۹ ۰/۶۹	جلبک قهوه ای <i>Fucus vesiculosus</i> L. <i>Fucus vesiculosus</i> L. <i>Ascophylo nodosum</i> (L.) Le Jolis
(Volesky, 1994) (Volesky, 1994)	۶/۰ ۶/۷	کادمیوم نیکل	۰/۶۷ ۰/۶۳	جلبک قرمز <i>Chondrus crispus</i> Stackh. <i>Chondrus crispus</i> Stackh.
(Volesky, 1994) (Volesky, 1994)	۶/۰ ۶/۰	کادمیوم نیکل	۰/۱۹ ۰/۲۲	جلبک سبز <i>Codium vermilara</i> (Olivi) Delle Chiaje <i>Codium vermilara</i> (Olivi) Delle Chiaje
(Holan, 1993)	۳-۹	کادمیوم	۱/۲۷	باکتری <i>Bacillus licheniformis</i>

از جمله آلاینده‌های اساسی و مهم در پساب، فلزات سنگین و سمی اند که در نهایت از طریق زنجیره غذایی به انسان منتقل می‌شوند و در تولید بیماری، ناهنجاری و حتی انواع سرطان نقش دارند، بنابراین جداسازی این فلزات از اهمیت خاصی برخوردار است. جلبک مطالعه

در چنددهه اخیر با توجه به افزایش رشد صنعت در کشور ما، مقدار زیادی از پساب کارخانجات بدون تصفیه یا با تصفیه ناقص وارد طبیعت می‌شوند.

تشکر و قدردانی

از سرکار خانم اسلام‌نیا جهت تکمیل نمودارها و ویرایش مقاله تشکر می‌کنیم.

شده در مقایسه با باکتری‌ها و قارچ‌ها بازدهی بالاتری می‌باشد. و میزان جذب دوفلزی در مقایسه با جذب تک‌فلزی نیز پذیرفتنی و در نمونه‌های حقیقی قابل استفاده است.

References/منابع

- رخشانی، پ.** ۱۳۸۴. بررسی و بهینه‌سازی شرایط حذف فلزات سنگین Zn، Ni، Cd و Pb از پساب‌ها به وسیلهٔ سرخس آبی آژولا. - پایان‌نامهٔ دکتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.
- Ahmady-Asbchin, S., Andres, Y., Gerente, C. and Cloirec, P.L.** 2008. Biosorption of Cu (II) from aqueous solution by *Fucus serratus*: Surface characterization and sorption mechanisms. - *Bioresource Technology* 99: 6150-6155.
- Browning, E.** 1996. Toxicity of industrial metals. - London Butterworths 300-324.
- Chen, X., Wu, W., Shi, J., Xu, X., Wang H. and Chen, Y.** 2007. Adsorption of copper and zinc on *pseudomonas putida* CZ1: Particle concentration effect and adsorption reversibility. - *Journal of Hazardous Materials* 54: 46-52.
- Diniz, V., Weber, M.E., Volesky, B. and Naja, G.M.** 2008. Column biosorption of La and Eu by *Sargassum*. - *Water Reserch* 42: 363-371.
- Fillali, B.K., Taoufik, J., Dzairi, F.Z., Talbi, M and Blaghen, M.** 2000. Wastewater bacterial isolates resistant to heavy metals and antibiotics. - *Current Microbiology* 41: 151-156.
- Herrero, R., Cordero, B., Lodeiro, P., Rey-Castro, C. and Sastre de Vicente, M.E.** 2006. Interactions of cadmium (II) and protons with dead biomass of marine algae *Fucus sp.* - *Marine Chemistry* 99: 106-116.
- Holan, Z.R., Volesky, B. and Prasetyo, I.** 1993. Biosorption of Cd by biomass of marine algae. - *Biotechnology Bioengineering* 41: 819-825.
- Holan, Z.R. and Volesky B.** 1994. Biosorption of lead and nickel by biomass of marine algae. - *Biotechnology Bioengineering* 43: 1001- 1009.
- Prasher, S.O., Beaugeard, M., Hawari, J., Bera, P., Patel, R.M. and Kim, S.H.** 2004. Biosorption of heavy metal by red algae (*Palmaria palmata*). - *Environmental Technology* 25: 1097-1106.
- Romera, E., Gonzalez, F., Ballester, A, Blazquez, M.L. and Munoz, J.A.** 2008. Biosorption of heavy metal by *Fucus spiralis*. - *Bioresource Technology* 99: 4684-4693.
- Smidsrød, O. and Draget, K.L.** 1996. Chemistry and physical properties of alginates. - *Carbohydrate in Europe* 14: 6-13.
- Spain, A. and Alm, E.** 2003. Implication of microbial heavy metal tolerance in the environment. - *Review in Undergraduate Research* 2: 1-6.
- Sternberg, S.P.K. and Dorn R.W.** 2002. Cadmium removal using *Cladophora* in batch, semi-batch and flow reactors. - *Bioresource Technology* 81: 249-255.
- Volesky, B.** 1990. - *Biosorption of Heavy Metals*. CRC Press, Boca Raton FL .

Volesky, B. 1994. Advances in biosorption of metals: Selection of biomass types. – FEMS Microbiol. Rev. 14: 291-302.

Wase, J. and Foster, C. 1997. – In Biosorbents for Metal Ions. Taylor and Francis Ltd., London.

Xie, S., Yang, J., Chen, C., Zh, Q.X. and Wang, C. 2007. Study on biosorption kinetics and thermodynamics of uranium by *Citrobacter freundii*. – Journal of Environmental Radioactivity 99: 126-133.