عملکرد زیست تودهٔ مردهٔ جلبک *فوکوس سراتوس* برای جذب زیستی هم‌زمان کادمیوم و نیکل از محیط آبی

سلمان احمدی اسبچین* و ناصر جعفری

دریافت: 1390/12/25/ پذیرش: 1392/9/24

گروه زیست‌شناسی سلولی و مولکولی، دانشکدهٔعلوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر

*مسئول مکاتبات: sa.ahmadi@umz.ac.ir

چکیده. روش‌های فیزیکی و شیمیایی جذب فلزات سنگین معایبی از جمله هزینهٔ زیاد و غیرمؤثربودن در غلظت‌های کم دارد. روش‌های زیستی جذب فلزات سنگین در چنددههٔ اخیر مورد توجه قرار گرفت. ازمیان جاذب‌های زیستی شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها و جلبک‌ها، جلبک‌ها بالاترین توانایی را در جذب فلز دارند. در این تحقیق مشخص شد که نقش اصلی در جذب هم‌زمان فلزات نیکل و کادمیوم برعهده اسیدآلژینیک است. جلبک قهوه‌ای *فوکوس سراتوس* به عنوان جاذب زیستی مقرون به‌صرفه در این تحقیق استفاده شده و جذب زیستی هم‌زمان یون کادمیوم و نیکل در راکتور بسته مطالعه شد. ساختار سطحی جلبک وکینتیک جذب فلزات بررسی شده است. زمان تعادل حدود 300 دقیقه بود. ایزوترم جذب با استفاده از معادله لانگموییر تفسیر شد. بیشینهٔ جذب برای فلزات کادمیوم و نیکل به‌ترتیب حدود 0/85 و 0/95 میلی‌مول بر گرم بود.

واژه‌های کلیدی. جلبک، کادمیوم، نیکل، اسید آلژینیک، جذب زیستی

Performance of dead *Fucus serratus* biomass in simultaneous 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 Alginic acid 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, alginic acid, biosorption

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

مقدمه

فلزات سنگین، سمی‌ترین آلاینده‌ها در محیط زیست هستند که علاوه‌بر ایجاد برخی عوارض سوء نظیر حساسیت، بیماری، مسمومیت و مرگ انسان، وارد زنجیرهٔ غذایی می‌شوند و حتی جهش‌زایی و سرطان نیز ایجاد می‌کنند. این فلزات سنگین از منابع گوناگون مانند فرسایش طبیعی مواد، بارش‌های جوی، فوران‌های آتشفشانی، خاک، فاضلاب‌ها، دفن بهداشتی، شیرابهٔ اماکن، معادن، روان‌آب‌های شهری و فاضلاب‌های صنعتی مختلف، شهری، کاغذ، الکترونیک، صنایع ذوب فلز، به‌خصوص آبکاری دباغی رنگرزی وارد محیط زیست می‌شوند. یکی از مهم‌ترین و خطرناک‌ترین آلوده‌کننده‌های زیست‌محیطی، آلودگی‌های ناشی از یون‌های فلزات سنگین موجود در پساب‌های واحدهای صنعتی است. در بسیاری از کشورهای جهان‌سوم و همچنین کشورهای درحال توسعه کنترل مناسبی بر سیستم‌های خروجی پساب که وارد محیط زیست می‌شود صورت نمی‌گیرد و همین به آلودگی‌های حاد و مزمن جمعیت‌های زیستی اعم از گیاهی، حیوانی و انسانی منجر می‌شود (رخشانی، 1384). به‌دلیل کارآنبودن و مقرون به‌صرفه‌نبودن بسیاری از روش‌های فیزیکی و شیمیایی برای حذف یون‌های فلزی از پساب‌ها، معرفی و استفاده از روش‌های ساده، ارزان و کارآمد برای حذف یون‌های فلزی ضروری است (Spain, 2003; Fillai, 2000). نیکل علاوه‌بر آسیب به ریه، حفره‌های بینی و سینوس باعث سوزش و خارش پوست و التهاب نیز می‌شود. عموماً فلز نیکل و ترکیبات آن سرطان‌زا هستند (Browing, 1986). جذب فلز توسط میکروارگانیسم‌ها می‌تواند با سیستم‌های مرده تحت عنوان جذب بیولوژیکی یا زنده تحت عنوان تجمع بیولوژیکی صورت بگیرد. مطالعات امکان‌سنجی برای کارهایی با مقیاس بزرگ نشان می‌دهند که فرآیندهای جذب بیولوژیکی کارآتر از فرایندهای تجمع بیولوژیکی‌اند (Strerberg, 2000). سازوکار باندشدگی فلزات به‌علت پیچیدگی جرم بیولوژیکی به‌آسانی قابل تصور نیست، بنابراین محل تجمع فلزات توسط میکروسکوپ الکترونی و اشعهٔ ایکس و تحلیل دیگر مشخص می‌شود. سازوکار جذب اصولاً شامل کمپلکس با سطح سلول، تعویض یونی و رسوب‌های ریز است (Diniz, 2008; Wass, 1997). ظرفیت جذب جاذب‌های بیولوژیکی مختلف به دلیل تفاوت این جاذب‌ها در جذب فلزات سنگین متفاوت است. کارآیی جاذب بیولوژیکی به حالت یونی میکروارگانیزم وابسته است و این جاذب باید همانند رزین‌های سنتتیک با فرم‌های متفاوت یونی مثل حالت پروتونی (H^+) یا کاتیونی (سدیم، کلسیم و منیزیم) اشباع شوند. به‌همین‌دلیل با توجه به نوع میکروارگانیزم و فلز سنگین به‌کمک اسیدهای معدنی، باز یا نمک املاح اولیه بر روی جرم بیولوژیکی انجام می‌شود. از دیگر عوامل مؤثر در پدیدهٔ جذب نقش گروه‌های مختلف جرم بیولوژیکی در حذف و بازیافت فلزات سنگین توسط پدیدهٔ جذب است؛ چراکه جرم‌های بیولوژیکی مختلف همچون باکتری‌ها، قارچ‌ها، مخمرها، سیانوباکتری‌ها و جلبک‌ها می‌توانند انواع گوناگونی از فلزات سنگین با مقادیر مختلف را جذب کنند (Volesky, 1990). جذب زیستی فلزات سنگین، تکنولوژی نسبتاً جدیدی برای تصفیهٔ پساب‌های صنعتی است و هدف آن حذف فلزات سمی و پاک‌سازی محیط زیست و نیز بازیافت فلزات باارزش است. از مزایای مهم تکنولوژی جذب زیستی، می‌توان به مؤثر بودن آن در کاهش غلظت یون‌های فلز سنگین به مقادیر بسیار پایین، قابلیت تولید مجدد جاذب، عدم تولید لجن، بازیافت فلز و استفاده از جاذب زیستی ارزان مثل جلبک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

طبیعی،که فراوان یافت می‌شود، اشاره کرد (Herrero, 2006).

جلبک‌ها به‌علت داشتن توانایی لازم برای ایجاد تودهٔ ضخیم درمیان اتوتروف‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. در دههٔ اخیر به بررسی و یافتن جاذب‌های کم‌هزینه پرداخته شده است، اما جلبک قهوه‌ای جاذبی بسیار خوب و مفید مطرح شده است. علت جذب این جلبک خصوصیت دیوارهٔ سلولی آن است که اسیدآلژینیک و اسید فوکوئیدان دارد و غالباً مسئول چلاته‌کردن فلزات سنگین است. اسیدآلژینیک در pH خنثی سایت‌های آنیونی کربوکسیلات و سولفات ایجاد می‌کند. فرم‌های آب شرین این جلبک‌ها دارای اسید گالاکتورونیک و پلیمرپکتین است که سایت‌های آنیونی دارند و توسط جذب الکترواستاتیک فلزات به آنها باند می‌شوند (Hollan, 1994).

حضورآلژینیک‌اسید در دیوارهٔ جلب، برای اتصال فلز اساسی و مهم است. گروه‌های کربوکسیل سطح آلژینیک‌اسید می‌تواند با فلزات کاتیونی مانند نیکل و کادمیوم واکنش نشان دهد (Xie, 2007). با توجه به توسعهٔ صنعت در کشور و تخلیهٔ فاضلاب‌های حاوی فلزات سنگین ازجمله کادمیوم و نیکل تحقیقات در زمینهٔ بیوتکنولوژی جذب فلز لازم است. فقدان تحقیق دربارهٔ جذب زیستی و بازیافت دو فلز مذکور به‌صورت هم‌زمان توسط جلبک قهوه‌ای *فوکوس سراتوس* در داخل کشور، این مطالعهٔ تحقیقاتی با هدف توسعهٔ تکنولوژی زیستی جدید برای حذف و بازیافت این دو فلز توسط این جلبک قهوه‌ای از محلول‌های آبی به صورت بیومس غیرفعال و تأثیر پارامترهای مختلف بر حذف آنها به صورت مطالعات سینتیکی و ایزوترم انجام گرفته است. همان‌گونه که در جدول شمارهٔ 1 نشان داده شد، نسبت میزان مانورونیک‌اسید و گلوکورونیک‌اسید در جذب فلزات به‌وسیلهٔ جلبک مهم است. در *فوکوس سراتوس* این نسبت 1 است.

جدول 1- میزان نسبت مانورونیک‌اسید و گلوکورونیک اسید در آلژینیک اسید جلبک‌ها.

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

نوع جلبک	میزان نسبت M/G
Macrocystis pyrifera (L.) C.Agardh	1/6
Laminaria hyperborea (Gunnerus) Foslie	0/45
Laminaria digitata (Hudson) J.V.Lamouroux	1/2
Laminaria japonica J.E.Areshoug	2/2
Ascophyllum nodosum (L.) Le Jolis	1/2
Fucus serratus L.	1/0
Sargassum fluitans Borgesen	0/19
Sargassum siliquosum J.Agah	0/72

علاوه‌براین میزان ترکیبات موجود در *فوکوس سراتوس* در جدول شمارهٔ 2 نشان داده شده است . با توجه به مکانیسم جذب میزان فلزات جذب شده در سطح جلبک برابر میزان فلز خارج شده از سطح جلبک است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

جدول 2- ترکیبات عناصر موجود در جلبک قهوه‌ای *فوکوس سراتوس*.

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

عناصر	***فوکوس سراتوس*** قطر 0/5 میلی‌متر
C (%)	40/0
N (%)	2/0
H (%)	5/0
O (%)	41/5
S (%)	0/5

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی جلبک‌ها و فراوری شیمیایی

جلبک قهوه‌ای *فوکوس سراتوس* از ساحل اقیانوس اطلس در شهر پورنیک 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 درنهایت با برش دادن، قطعاتی با قطر 0/5 میلی‌متر انتخاب و استفاده شد.

آزمایش‌های سینتیک جذب

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

پارامترهای سینتیکی جذب زیستی

به منظور تحقیق دربارهٔ سازوکارجذب بیولوژیکی و مشخص کردن مرحلهٔ کنترل‌کنندهٔ عمل جذب نظیر انتقال یا مرحلهٔ واکنش شیمیایی، از مدل‌های سینتیکی استفاده می‌شود. در این مطالعه از مدل‌های شبه‌درجهٔ یک و شبه‌درجهٔ دو برای مدل‌سازی اطلاعات تجربی استفاده می‌شود.

معادلهٔ شبه‌درجهٔ یک لاگرانژ به این صورت است:

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

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

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_{ad}t}{2.303} \quad (2)$$

در معادلهٔ شبه‌درجهٔ یک، شدت پرشدن سایت‌های جاذب متناسب با تعداد سایت‌های خالی در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای k1 و q_{eq} با استفاده از رسم نمودار خطی $\log(q_{eq}-q_t)$ برحسب t به دست می‌آیند. معادلهٔ شبه درجهٔ دو براساس میزان ظرفیت تعادلی است و در آن شدت پر شدن سایت‌های جاذب متناسب با مربع تعداد سایت‌های خالی جاذب فرض می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

معادلهٔ شبه درجه دوم به این صورت است:

$$\frac{d_{qt}}{dt} = K_2(q_{eq} - q_t)^2 \quad (3)$$

در این معادله K_2 ثابت سرعت واکنش درجهٔ دوم برحسب g/mg.min است. q_e و q_t همانند معادلهٔ شبه‌درجهٔ اول هستند. با انتگرال‌گیری از معادلهٔ 3، این رابطه به دست می‌آید.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

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

پارامترهای تعادلی جذب زیستی

اطلاعات تعادلی تحت عنوان ایزوترم جذب برای طراحی سیستم ضروری است. در این تحقیق از ایزوترم لانگموئیر برای مدل‌سازی تعادلی جذب کادمیوم و نیکل به صورت هم‌زمان توسط *فوکوس سراتوس* استفاده شده است.

اگر یون‌های فلزی به طور مسقل به سایت‌های جاذب متصل شوند و جذب یون اول تأثیری بر جذب یون‌های دیگر نداشته باشد و جذب نیز به‌صورت تک لایه انجام شود، می‌توان از ایزوترم لانگموییر برای مدل‌سازی استفاده کرد و معادله به این صورت است:

$$q_e = \frac{q_m bC_e}{1 + bC_e} \quad (5)$$

Qe میزان جذب یون فلزی درحالت تعادل (میلی‌گرم بر گرم)، Ce غلظت یون فلزی درحالت تعادل (میلی‌گرم بر لیتر)، q_m بالاترین مقدار یون فلزی بر واحد وزن جلبک برای تشکیل تک‌لایهٔ کامل بر سطح جاذب در بالاترین غلظت تعادلی یون فلزی و b ثابت لانگموییر مربوط به مقدار نیروی جاذبه بین سایت‌های قابل اتصال و یون‌های فلزی است و نشان دهندهٔ غلظتی است که در آن مقدار $q_m/2$ از یون کادمیوم و نیکل با جاذب پیوند برقرار کرده است و هرچه مقدار b بالاتر باشد جاذبه بین جاذب و جذب شونده بیشتر است.

Q_m در نشان‌دادن محدودیت‌های تجربی ظرفیت جذب، زمانی که سطح به طور کامل به‌وسیلهٔ یون فلزی پوشیده شده و مقایسهٔ بازده جاذب به‌خصوص در مواردی که جاذب به حالت اشباع نمی‌رسد، کمک می‌کند. q_m و b را می‌توان با رسم نمودار خطی 1/Qe برحسب 1/Ce مشخص کرد. پارامتر بدون بعد تعادل R تعریف می‌شود که نشان‌دهندهٔ مطلوب‌بودن عمل جذب به‌وسیلهٔ یک جاذب است.

در مورد ایزوترم لانگموییر این فرضیه‌ها در نظر گرفته می‌شود: تعداد جایگاه‌های جذب ثابت است، تمامی جایگاه‌های جذب یکسان هستند، فقط یک مادهٔ جذب شونده وجود دارد و درنهایت یک مولکول جذب شونده با یک جایگاه فعال واکنش می‌دهد. فرم خطی لانگموییر به این صورت است:

$$R = \frac{1}{1 + bC_0} \quad (6)$$

بازیافت کادمیوم و نیکل و استفادهٔ مجدد از بیوماس

در این مرحله، آزمایش‌های بازیافت کادمیوم و نیکل و احیای بیوماس غیرفعال جلبک قهوه‌ای *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 5 ساعت و صاف‌کردن محلول، جلبک روی صافی را با آب مقطر شست شو دادیم و در50 میلی لیتر اسید نیتریک 0/1 مولار قرار دادیم و به‌مدت زمان 15 دقیقه عمل مخلوط کردن با استفاده از شیکر با سرعت rpm 200 انجام گرفت. جهت عمل احیای بیوماس به منظور

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

کاربرد مجدد آن در سیکل جذب زیستی، جلبک‌های روی صافی را، که فلز آن‌ها در مرحلهٔ قبل واجذب شده بودند، در 50 میلی لیتر محلول کلریدکلسیم 0/1 مولار قرار دادیم و به مدت 15 دقیقه عمل هم زنی با استفاده از شیکر با سرعت200 rpm انجام شد. درنهایت پس از اتمام این زمان، نمونه‌ها 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 مرحلهٔ بعد با تیمار جلبک توسط سوسپانسیون آب مقطر مشخص شد. بررسی نشان می‌دهد با تیمار جلبک به وسیلهٔ آب مقطر، قطر کانال‌ها و سطح ویژهٔ جلبک یعنی BET افزایش پیدا می‌کند و میزان جذب در زمان‌های مختلف تفسیر می‌شود. علت افزایش آرام میزان جذب این است که با گذشت زمان منافذ باز می‌شوند و یون‌های کادمیوم و نیکل می‌توانند وارد شیارها شوند. جذب اولیه مربوط به گروه‌های فعال سطحی جلبک است که درمعرض مستقیم فلزات سمی قرار می‌گیرند و جذب اندک در زمان‌های طولانی به اتصال این فلزات به گروه‌های سطحی مربوط است که قبلاً مخفی بوده‌اند؛ ولی اکنون آشکار شده‌اند (جدول 3).

جدول 3- مقایسهٔ 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* شسته‌شده**
حجم کلی نفوذ	0/027 میلی‌لیتر بر گرم	0/081 میلی‌لیتر بر گرم
قطر حفرهٔ سطح جلبک	5942 نانومتر	15650 نانومتر
سطح BET	0/19 ± 0/03 مترمکعب بر گرم	1/79 ± 0/22 مترمکعب بر گرم

خواص سطحی ویژه

آزمایش‌های کینتیک

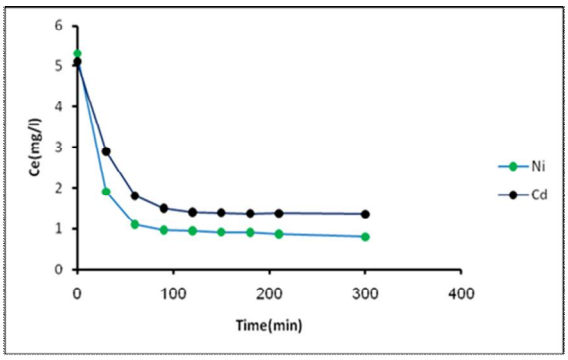
کینتیک کادمیوم و نیکل به وسیلهٔ بیوماس *فوکوس سراتوس* با استفاده از آب مقطر در دمای 25 درجهٔ سانتی‌گراد، pH درحدود 5/5 به دست آمده، که زمان تعادل آن درحدود 340 دقیقه است. بعد از گذشت این زمان راندمان جذب ثابت می‌ماند. این مسئله در مصارف صنعتی مهم است، زیرا زمان تعادل در باکتری‌ها درحدود چند دقیقه، در جلبک‌ها درحدود چندساعت، در کیتوزان به میزان چندروز و برای کربن فعال درحدود چندهفته است. درنتیجه در مقایسه با باکتری‌ها این زمان طولانی‌تر ولی در مقایسه با کیتوزان و کربن فعال این زمان کمتر است. همین آزمایش در آب معمولی انجام شد که منحنی متفاوتی به‌دست آمد. این تفاوت به حضور یون‌های کلسیم در آب معمولی مربوط می‌شود که در اتصال به گیرنده‌های سطح سلول با فلز کادمیوم و نیکل رقابت می‌کنند. با مقایسهٔ کینتیک جذب کادمیوم و نیکل در آب مقطر و آب شیر مشخص

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

شد تفاوت این دو زیاد نیست و می‌توان در امور صنعتی از پساب و فاضلاب کارخانجات استفاده کرد. هم‌چنین با مطالعهٔ منحنی موردنظر به این نتیجه می‌رسیم که راندمان جذب نیکل در مقایسه با کادمیوم بیشتر است (شکل 1).

آزمایش‌های ایزوترم

از مهم‌ترین آزمایش‌ها در بحث جاذب‌های بیولوژیک آزمایش ایزوترم است. منحنی ایزوترم تثبیت کادمیوم و نیکل به صورت جدا و همچنین به صورت هم‌زمان انجام شده است.

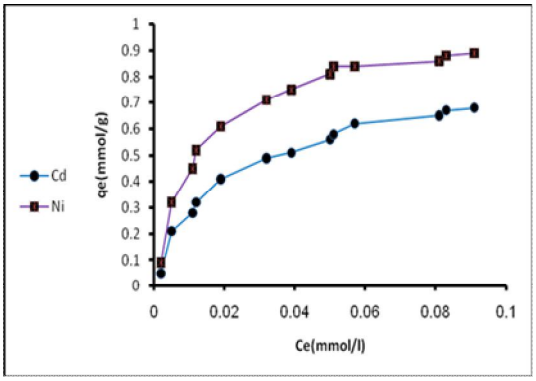


شکل 1- کینتیک تثبیت یون کادمیوم و نیکل به وسیلهٔ جلبک در آب مقطر (غلظت اولیهٔ کادمیوم و نیکل 0/135 میلی‌مول بر لیتر و غلظت جلبک 0/1 گرم بر لیتر).

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).

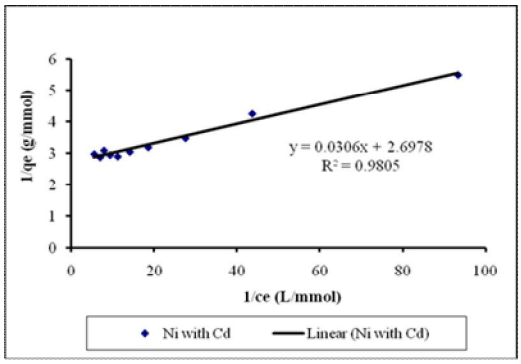
این آزمایش‌ها در آب مقطر و آب معمولی توسط *فوکوس سراتوس* درمحلول حاوی pH حدود 0/2 ± 5 انجام شده است و در اشکال 2 و 3 و جدول 4 آمده است. براساس مدل لانگمویر برای تثبیت کادمیوم حداکثر جذب برابر 0/85 میلی‌مول بر گرم است و ماکزیمم میزان جذب یون نیکل 0/95 میلی‌مول بر گرم است؛ ولی این میزان در آب معمولی به‌ترتیب برای کادمیوم و نیکل 0/45 و 0/51 میلی‌مول بر گرم است. حضور 47 میلی‌گرم بر لیتر از کلسیم در آب معمولی و رقابت آن با یون‌های فلزی نیکل و کادمیوم، باعث کاهش جذب یون‌های فلزی تحت مطالعه شد. میزان جذب یون‌های نیکل و کادمیوم در آب معمولی نیز زیاد است. گفتنی است که منحنی ایزوترم جذب فلزات مطالعه‌شده در آب مقطر از معادلهٔ لانگمویر پیروی می‌کند (شکل 2)، ولی میزان جذب این فلزات در آب معمولی از معادلهٔ فروندلیچ پیروی می‌کند. همچنین ایزوترم نیکل براساس معادلهٔ خطی لانگمویر در حضور کادمیوم در شکل3 آمده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل 2 - ایزوترم تثبیت نیکل و کادمیوم در آب مقطر (میزان غلظت از 0/011 تا 0/387 میلی‌مول بر لیتر در آب مقطر و غلظت جلبک 0/1 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 3- ایزوترم تثبیت نیکل در حضور یون کادمیوم در آب مقطر با استفاده از مدل خطی لانگمویر. (میزان غلظت از 0/011 تا 0/387 میلی‌مول بر لیتر در آب مقطر و غلظت جلبک 0/1 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 4- 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.*

فلز	b_L لیتر بر میلی‌مول	q_m میلی‌مول بر گرم	r^2
کادمیوم	24/23	0/852	0/948
نیکل	21/44	0/946	0/990

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

بحث و نتیجه‌گیری

پساب حاوی فلزات سنگین از معضلات مهم کنونی است. در ده‌سالهٔ اخیر از قارچ‌ها، مخمرها، جلبک‌ها و باکتری‌ها برای جذب فلزات سنگین و سمی استفاده شده است (Prasher, 2004). جذب فلزات تحت مطالعه به‌وسیلهٔ جلبک در مقایسه با دیگر جاذب‌های زیستی از کارایی بالاتری برخوردار است (جدول 5). در این تحقیق از جلبک به جهت راندمان بالاتر نسبت به دیگر جاذب‌های زیستی استفاده شده است. در این تحقیق مشخص شدد که به میزان کادمیوم و نیکل جذب شده، یون کلسیم و منیزیم و سدیم از سطح جلبک آزاد شود. اسید آلژینیک در سطح دیوارهٔ 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 به‌صرفه 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.

جدول 5- مقایسهٔ میزان جذب فلز کادمیوم و نیکل در جاذب‌های مختلف.

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

جاذب زیستی	بیشینه جذب (میلی مول بر گرم)	فلز	pH	رفرنس
جلبک قهوه ای *Fucus vesiculosus* L. *Fucus vesiculosus* L. *Ascophylom nodosum* (L.) Le Jolis	0/65 0/39 0/69	کادمیوم نیکل نیکل	3/5 3/5 3/5	(Hollan, 1994) (Romera, 2008) (Smaidsrot, 1996)
جلبک قرمز *Chondrus crispus* Stackh. *Chondrus crispus* Stackh.	0/67 0/63	کادمیوم نیکل	6/0 6/7	(Volesky, 1994) (Volesky, 1994)
جلبک سبز *Codium vermilara* (Olivi) Delle Chiaje *Codium vermilara* (Olivi) Delle Chiaje	0/19 0/22	کادمیوم نیکل	6/0 6/0	(Volesky, 1994) (Volesky, 1994)
باکتری *Bacillus licheniformis*	1/27	کادمیوم	3-9	(Holan, 1993)

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

ازجمله آلاینده‌های اساسی و مهم در پساب، فلزات سنگین و سمی اند که درنهایت ازطریق زنجیرهٔ غذایی به انسان منتقل می‌شوند و درتولید بیماری، ناهنجاری و حتی انواع سرطان نقش دارند، بنابراین جداسازی این فلزات از اهمیت خاصی برخوردار است. جلبک مطالعه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

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.

تشکر و قدردانی

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

References/منابع

رخشائی، پ. 1384. بررسی و بهینه‌سازی شرایط حذف فلزات سنگین Zn، Ni، Cd و Pb از پساب‌ها به وسیلهٔ سرخس آبزی آزولا. – پایان‌نامهٔ دکترا، 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. – Biotechlogy 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. – Carbhydrate 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 .

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

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., Londan.

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]