مجله دانشكده بهداشت و انستيتو تحقيقات بهداشتي
دوره ۵ شماره ۲ تابستان ۱۳۸٦ , صفحات : ۲۴-۱۳

بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) از محيط‌هاي آبي بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم

مهندس رضا سعيدي: دانشجوي دوره دكتري، گروه مهندسي بهداشت محيط، دانشكده بهداشت و انستيتو تحقيقات بهداشتي، دانشگاه علوم پزشكي تهران
دكتر كاظم ندافي: دانشيار، گروه مهندسي بهداشت محيط، دانشكده بهداشت و انستيتو تحقيقات بهداشتي، دانشگاه علوم پزشكي تهران
نويسنده رابط:knadafi@sina.tums.ac.ir
دكتر رامين نبي زاده: استاديار، گروه مهندسي بهداشت محيط، دانشكده بهداشت و انستيتو تحقيقات بهداشتي، دانشگاه علوم پزشكي تهران
دريافت : ۱۳۸۴/۱۱/۹ پذيرش : ۱۳۸۵/۳/۳۰

چكيده

زمينه و هدف: اين مطالعه با هدف بررسي بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم انجام گرديد. بدين منظور سينتيک و ايزوترم بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) مورد بررسي قرار گرفت.

روش كار: تمام آزمايش‌هاي بيوجذب در فاز منقطع و در محلول حاوي يک فلز انجام گرديد. آزمايش‌هاي سينتيک در سه غلظت اوليه سرب(II) و كادميوم(II) و نسبت ثابت ماده جذب شدني به جاذب صورت گرفت. در آزمايش‌هاي ايزوترم محدوده غلظت اوليه سرب(II) و كادميوم(II)، ۵-۰/۰۵ ميلي مولار بود.

نتايج: آزمايش‌هاي سينتيک بيوجذب نشان داد كه ميزان جذب سرب(II) و كادميوم(II) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم در طي مدت ۱۵ دقيقه به ۹۶-۸۸% ظرفيت تعادلي مي‌رسد و حداكثر زمان رسيدن به تعادل ۲ ساعت مي‌باشد. سينتيک بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) از مدلهاي سرعت درجه دوم كاذب و اشباع تبعيت مي‌نمود (R^2>۰/۹۹). براي مدل‌سازي ايزوترم بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم از معادلات ايزوترم لانگموئر، فروندليش، فروندليش- لانگموئر و ردليش- پيترسن استفاده شد. ايزوترم بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) از مدل ردليش- پيترسن تبعيت مي‌نمود (R^2>۰/۹۹). ساير مدلهاي ايزوترم نيز تطابق نسبتاً خوبي با داده‌هاي آزمايشگاهي داشتند (R^2>۰/۹۳). بر طبق معادله لانگموئر، حداكثر ظرفيت بيوجذب (q_m) سرب(II) و كادميوم(II) به ترتيب ۱/۷۰ و ۱/۰۲ ميلي مول بر گرم بدست آمد.

نتيجه‌گيري: نتايج اين مطالعه نشان داد كه جلبک قهوه‌اي سارگاسوم يک بيوجاذب با ظرفيت جذب بالا براي سرب(II) و كادميوم(II) مي‌باشد.

واژگان كليدي: بيوجذب، سارگاسوم، سرب(II)، كادميوم(II)، سينتيک، ايزوترم

مقدمه

آلودگي محيط آبي به فلزات سنگين، يكي از مهمترين مشكلات زيست محيطي است كه اين امر به دليل اثرات سميت و خاصيت تجمع پذيري آنها در زنجيره غذايي مي‌باشد. در ميان فلزات سنگين، سرب(II) و كادميوم(II) اولويت بالايي براي حذف از محيط آبي دارند (Sternberg and Dorn 2002; Volesky 2001).

روشهاي متداول حذف فلزات سنگين از محيط آبي شامل: ترسيب شيميايي، تعويض يون، جذب، فرايندهاي غشايي و تبخير مي‌باشد كه روشهايي گران‌قيمت و با هزينه سرمايه گذاري و بهره برداري بالا محسوب مي‌شوند (Aksu 2002; Eckenfelder 2000). بدين ترتيب، براي حذف مؤثر فلزات سنگين از آب و فاضلاب، نياز مبرمي به توسعه روشي جديد، ارزان قيمت و اقتصادي وجود دارد. براي

پاسخگويي به اين نياز، در سالهاي اخير مطالعات در زمينه بيوجذب (Biosorption) شدت گرفته است (Dönmez et al. 1999; Figueira et al. 2000; Loukidou et al. 2003).

بيوجذب، حذف فلزات سنگين از محيط آبي از طريق جذب منفعل آنها بر روي ميكروارگانيزمهاي غيرزنده (باكتري، قارچ، جلبک) و ساير اجرام آلي (مانند سبوس برنج، پوست ميوه، برگ و پوست درختان و...) است (Davis et al. 2003). مزاياي فرايند بيوجذب در مقايسه با روشهاي متداول حذف فلزات سنگين، شامل: مقرون به صرفه بودن، خاصيت جذب انتخابي، قابليت احياء بيوجاذب و بازيافت فلزات، بالا بودن سرعت فرايند و عدم توليد لجن مي‌باشد. برخي بيوجاذب‌ها (Biosorbent) با ظرفيت بالاي جذب خود قادر به رقابت با فناوري‌هاي متداول در حذف فلزات سنگين هستند. در سالهاي اخير تحقيقات درمورد بيوجاذب‌ها بر روي جرم‌هاي آلي زايداتي مانند زايدات فرايند تخمير و لجن فعال توليد شده در تصفيه‌خانه‌هاي فاضلاب شهري و اجرام آلي فراوان در محيط زيست مانند جلبكهاي دريايي متمركز شده است (Diniz and Volesky 2005; Ma and Tobin 2003).

بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) از محيط آبي با استفاده از مواد بيوجاذب مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. بيوجذب كادميوم(II) بر روي قارچ آسپرژيلوس اوريزا (Aspergillus oryzae) بسيار سريع بود، ۹۰% جذب تعادلي در مدت ۱۰ دقيقه صورت گرفت و جذب در مدت ۱ ساعت به تعادل رسيد (Kiff and Little 1986; ژانگ و همكاران ۱۹۹۸) مشاهده نمودند كه بيوجذب سرب(II) بوسيله قارچ ريزوپوس نيگريكنس (Rhizopus nigricans) در ۲۰ دقيقه اوليه بسيار سريع است و در مدت ۲ ساعت به تعادل مي‌رسد. سينتيک بيوجذب كادميوم(II) بوسيله كتين از معادله سرعت درجه دوم كاذب پيروي مي‌كرد (Benguella and Benaissa 2002; ماتئيكال و يو ۱۹۹۹) نشان دادند كه حداكثر ظرفيت بيوجذب سرب(II) بر روي جلبكهاي دورويلا پوتاتروم (Durvillaea potatorum) و اكلونيا راديانا (Ecklonia radiata) به ترتيب ۱/۶ و ۱/۳ ميلي‌مول بر گرم مي‌باشد. حداكثر ظرفيت بيوجذب كادميوم(II) بر روي استريتومايسس ريموسوس (Streptomyces rimosus) ، ۰/۵۸ ميلي مول بر گرم بدست آمد و داده‌هاي ايزوترم بيوجذب از مدل لانگموئر تبعيت مي‌نمود (Selatnia et al. 2004).

هدف اين پژوهش مطالعه بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم بود، بدين منظور سينتيک و ايزوترم بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) مورد بررسي قرار گرفت.

روش كار

آماده سازي بيوجاذب : در اين مطالعه از جلبک قهوه‌اي سارگاسوم به عنوان بيوجاذب استفاده گرديد. جلبک قهوه‌اي سارگاسوم از درياي عمان در بندر چابهار برداشت شد. بيوجاذب برداشت شده براي جداسازي شن و ماسه و ساير ناخالصي‌ها با آب شير و سپس با آب ديونيزه شستشو داده شد. بيوجاذب حاصل تحت نور خورشيد و در مرحله بعد در كوره با دماي۷۰ درجه سانتيگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. عمل خردسازي با استفاده از يک آسياب صورت گرفت. در مرحله بعد با استفاده از الكهاي استاندارد، بيوجاذب با اندازه ۰/۳-۰/۲ ميلي متر براي استفاده در پژوهش انتخاب شد؛ سپس براي اشباع محلهاي جذب بيومس با يونهاي هيدروژن، جلبكها با غلظت ۵۰ گرم بيومس بر ليتر اسيد به مدت ۳۰ دقيقه تحت اختلاط آرام در تماس با هيدروكلريک اسيد ۰/۱ مولار قرار گرفت. در مرحله آخر، بيومس با آب ديونيزه شستشو داده شد و در كوره با دماي۷۰ درجه سانتيگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد.

مواد شيميايي : تمام محلولهاي آزمايش مصنوعي بود. محلولهاي مصنوعي با استفاده از آب ديونيزه و نمكهاي $Pb(NO_3)_2$ ، $Cd(NO_3)_2.2H_2O$ ، NaCl ، KCl ،

$MgCl_2.6H_2O$ و $CaCl_2.2H_2O$ (ساخت شرکت Merck آلمان) ساخته شد. pH اوليه محلولهاي مصنوعي با استفاده از سديم هيدروکسيد ۱-۰/۱ مولار و هيدروکلريک اسيد ۱-۰/۱ مولار (ساخت شرکت Merck آلمان) و به وسيله يک pH متر (CAMLAB Ltd, Model CG842) در مقادير دلخواه تنظيم شد.

آزمايش‌هاي بيوجذب: تمام آزمايش‌هاي بيوجذب در فاز منقطع انجام گرديد. از يک دستگاه جار تست (محصول شرکت (AZTEC ENVIRONMENTAL CONTROL Ltd) با سرعت همزدن ۲۰۰ دور در دقيقه براي مخلوط کردن محلولهاي مصنوعي و بيوجاذب استفاده شد. حجم محلولهاي آزمايش ۱ ليتر بود و تمام آزمايش‌ها در دماي اتاق (۱±۲۰ درجه سانتيگراد) انجام گرديد.

آزمايش‌هاي سينتيک بيوجذب : آزمايش‌هاي سينتيک بيوجذب در سه غلظت اوليه سرب(II) و کادميوم(II) و نسبت ثابت ماده جذب شدني به جاذب در محلول حاوي يک فلز صورت گرفت. غلظت هاي اوليه فلز ۵، ۱ و ۰/۵ ميلي مولار و نسبت ماده جذب شدني به جاذب، ۲ ميلي مول بر گرم انتخاب شد؛ بنابراين ۲/۵، ۰/۵ و ۰/۲۵ گرم بيوجاذب به ترتيب به ظروف آزمايش با غلظت اوليه فلز ۵، ۱ و ۰/۵ ميلي مولار اضافه شد. pH اوليه محلولهاي مصنوعي در ۵ تنظيم شد و در طول آزمايش‌هاي سينتيک pH محلولها مورد پايش قرار گرفت. آزمايش‌هاي سينتيک در مدت ۵ ساعت انجام گرديد و نمونه‌ها در زمانهاي از پيش تعيين شده از ظروف آزمايش برداشت شد و براي تعيين غلظت باقيمانده فلز، آناليز گرديد.

آزمايش‌هاي ايزوترم بيوجذب: آزمايش‌هاي سينتيک نشان داد که حداکثر زمان رسيدن به تعادل ۲ ساعت مي‌باشد؛ بنابراين زمان آزمايش‌هاي تعادل بيوجذب ۳ ساعت در نظر گرفته شد. آزمايش‌هاي ايزوترم بيوجذب سرب(II) و کادميوم(II) به وسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم در سامانه حاوي يک فلز صورت گرفت. محدوده غلظت اوليه سرب(II) و کادميوم(II)، ۵-۰/۰۵ ميلي مولار بود. pH اوليه محلولهاي آزمايش در ۵ تنظيم شد و سپس ۵۰۰ ميلي گرم جلبک قهوه‌اي سارگاسوم به هر ظرف آزمايش اضافه شد و در پايان هر آزمايش pH محلول اندازه‌گيري شد.

آناليز فلزات سنگين: نمونه‌ها از فيلتر غشايي با اندازه روزنه ۰/۴۵ µm (Mixed cellulose ester) عبور داده مي‌شد و غلظت باقيمانده فلزات سنگين (سرب(II) و کادميوم(II)) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمي شعله‌اي (FAAS, Chem. Tech Analytical, Model ALPHA4) تعيين مي‌گرديد. براي انجام اين کار از دستورالعمل ۳۱۱۱B کتاب "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" استفاده شد (APAH, AWWA and WEF 1998).

مدل‌سازي سينتيک بيوجذب : براي مدل‌سازي سينتيک بيوجذب سرب(II) و کادميوم(II) بر روي جلبک قهوه‌اي سارگاسوم از معادلات سرعت درجه اول کاذب (Langergren) (معادله ۱)، درجه دوم کاذب (معادله ۲)، اشباع (Mixed-order) (معادله ۳) و درجه دوم (معادله ۴) استفاده شد:

$$\ln\frac{(q_e-q)}{q_e} = -k_1 t \qquad (۱)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e}t \qquad (۲)$$

$$\frac{1}{t}\ln\frac{C_0}{C_t} = -\frac{k_0}{K} - \frac{1}{K}\left(\frac{C_0 - C_t}{t}\right) \qquad (۳)$$

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + kt \qquad (۴)$$

در جايي که، t: زمان (دقيقه)، q و q_e: مقدار يون فلزي جذب شده در هر زمان و در زمان تعادل (ميلي مول بر گرم)، k_1: ثابت معادله سرعت درجه اول کاذب (بر دقيقه)، k_2: ثابت معادله سرعت درجه دوم کاذب (گرم بر ميلي مول بر دقيقه)، C_0 و C_t: غلظت يون فلزي در زمان صفر و در زمان t (ميلي مولار)، k_0 (ميلي مولار بر دقيقه) و K (ميلي مولار): ثوابت معادله سرعت اشباع و k: ثابت معادله سرعت درجه دوم (گرم بر ميلي مول بر دقيقه) مي‌باشند (Azizian 2004; Benguella and Benaissa 2002; Metcalf and Eddy Inc 2003).

مدل‌سازي ايزوترم بيوجذب : براي مدل‌سازي ايزوترم بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) بر روي جلبک قهوه‌اي سارگاسوم از مدلهاي ايزوترم لانگموئر، فروندليش، فروندليش- لانگموئر و ردليش- پيترسن استفاده شد.

مدل ايزوترم جذب لانگموئر مربوط به جذب تك لايه‌اي مي‌شود. مفروضات معادله لانگموئر شامل موارد زير است:

- حداكثر جذب در زماني روي مي‌دهد كه سطح جاذب با يك لايه تك مولكولي از ماده حل شدني پوشيده شده باشد.

- انرژي جذب در تمام نقاط ثابت و يكسان است.

- مولكولهاي ماده جذب شونده قادر به جابجايي در سطح جاذب نيستند.

معادله لانگموئر به صورت زير بيان مي‌شود:

$$q_e = \frac{bq_m C_e}{1+bC_e} \qquad (۵$$

در جايي كه؛ C_e: غلظت ماده حل شدني در حالت تعادل (ميلي مولار)، q_m: حداكثر ظرفيت جذب (ميلي مول بر گرم) و b: ثابت معادله لانگموئر (ليتر بر ميلي مول) مي‌باشند (Sheng et al. 2004; Yalçınkaya et al. 2002).

معادله فروندليش جذب را در يك سطح ناهمگون از نظر انرژي جذب بيان مي‌كند و به صورت زير تعريف مي‌شود:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \qquad (۶)$$

در اينجا K_F و n ثوابت مدل فروندليش و به ترتيب شاخصهايي از ظرفيت و شدت جذب مي‌باشند. معادله فروندليش تجربي مي‌باشد و براي تفسير داده‌هاي آزمايشگاهي قابل كاربرد است(Loukidou et al. 2004, Selatnia et al. 2004b).

مدل فروندليش- لانگموئر به صورت زير بيان مي‌شود:

$$q_e = \frac{bq_m C_e^{1/n}}{1+bC_e^{1/n}} \qquad (۷)$$

در اينجا b، q_m و n ثوابت مدل فروندليش- لانگموئر مي‌باشند (Volesky 2003).

مدل ردليش- پيترسن به صورت زير بيان مي‌شود:

$$q_e = \frac{K_{RP} C_e}{1+a_{RP} C_e^{\beta}} \qquad (۸)$$

در جايي كه، K_{RP} (ليتر بر گرم)، a_{RP} (ليتر بر ميلي مول به توان β) و β (بدون بعد) ثوابت مدل ردليش- پيترسن مي‌باشند (Aksu 2002; Volesky 2003).

نتايج

مطالعه سينتيک : سينتيک بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم در نمودار ۱- نشان داده شده است. نتايج مدل‌سازي سينتيک بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم با استفاده معادلات سرعت درجه اول كاذب، درجه دوم كاذب، اشباع و درجه دوم در جدول ۱- مشاهده مي‌شود.

مطالعه ايزوترم : نتايج مدل‌سازي ايزوترم بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم با استفاده از مدلهاي ايزوترم لانگموئر، فروندليش، فروندليش- لانگموئر و ردليش- پيترسن در نمودار۲ نشان داده شده است. پارامترهاي مدلهاي ايزوترم لانگموئر و فروندليش براي بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم در جدول ۲ مشاهده مي‌شود. پارامترهاي مدلهاي ايزوترم فروندليش- لانگموئر و ردليش- پيترسن براي بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم در جدول ۳ نشان داده شده است.حداكثر ظرفيت بيوجذب (q_m) سرب(II) و كادميوم(II) بدست آمده از اين مطالعه و برخي از مطالعات ديگر جهت مقايسه در جدول ۴ آورده شده است.

بحث

مطالعه سينتيک : مطالعه سينتيک نشان داد كه بيوجذب سرب(II) و كادميوم(II) بر روي جلبک قهوه‌اي سارگاسوم داراي سرعت بالايي است؛ بطوريكه ميزان جذب فلزات سنگين در طي مدت ۱۵ دقيقه به ۹۶%-۸۸% ظرفيت تعادلي

رسید و حداکثر زمان رسیدن به تعادل ۲ ساعت بود. بالا بودن سرعت واکنش حجم واحدهاي فرايندي را کاهش مي‌دهد و از ديدگاه مهندسي و اقتصادي، بسيار مطلوب و حائز اهميت است.

سرعت بالاي بيوجذب در مطالعات ديگر نيز مشاهده شده است. بيوجذب کبالت بوسيله جلبک آسکوفيلوس نودوسوم (Ascophyllum nodosum) بسيار سريع بود و در مدت ۱۰ دقيقه به تعادل رسيد(Kuyucak and Volesky 1989 ;ماتئيکال و يو ۱۹۹۹) سينتيک بيوجذب سرب(II) بوسيله جلبک اکلونيا رادياتا را مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده نمودند که سرعت فرايند بيوجذب بالا است و ۶۰%-۵۰% جذب تعادلي در مدت ۱۰ دقيقه صورت مي‌گيرد. کوسيچ و همکاران در سال ۲۰۰۲ مشاهده کردند که بيوجذب کروم(III) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم سريع بوده و در مدت ۱۰ دقيقه، ۶۰% ظرفيت تعادلي جذب تکميل مي‌گردد. همچنين بيوجذب سرب(II) بوسيله جلبک دورويلا پوتاتروم سريع بود و ميزان جذب سرب(II) در مدت ۳۰ دقيقه به ۹۰% ظرفيت تعادلي رسيد (Matheickal and Yu 1999).

معادلات سرعت درجه دوم کاذب و اشباع تطابق خوبي با داده‌هاي آزمايشگاهي دارند و ضريب همبستگي آنها با داده‌هاي آزمايشگاهي بسيار بالا (R^2>۰/۹۹) مي‌باشد؛ بنابراين سينتيک بيوجذب سرب(II) و کادميوم(II) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم از معادلات سرعت درجه دوم کاذب و اشباع پيروي مي‌نمايد.

لوکيدو و همکاران در سال ۲۰۰۴ سينتيک بيوجذب کروم(VI) بوسيله آئروموناس کاويا (Aeromonas caviae) را مورد بررسي قرار دادند و مشاهده کردند که معادله سرعت درجه دوم کاذب در مقايسه با ساير مدلهاي سينتيک تطابق بهتري با داده‌هاي آزمايشگاهي دارد. آناليز سينتيک بيوجذب سرب(II)، کادميوم(II)، نيکل(II) و روي(II) بر روي فارچ موکور روکسي (Mucor rouxii) نشان داد که سينتيک بيوجذب اين فلزات سنگين از معادله سرعت درجه دوم کاذب پيروي مي‌کند (Yan and Viraraghavan 2003).

ثابت سرعت معادله درجه دوم کاذب (k_2) براي بيوجذب سرب(II) در غلظتهاي اوليه: ۵، ۱ و ۰/۵ ميلي مولار، به ترتيب به ميزان ۱/۸۶، ۰/۸۳ و ۰/۵۲ گرم بر ميلي مول بر دقيقه، بدست آمد و ثابت سرعت معادله اشباع (k_0) براي بيوجذب سرب(II) در غلظتهاي اوليه: ۵، ۱ و ۰/۵ ميلي مولار به ترتيب برابر ۰/۰۰۳۴، ۰/۰۰۱۰ و ۰/۰۰۰۷ ميلي مولار بر دقيقه محاسبه شد. همچنين ثابت سرعت معادله درجه دوم کاذب (k_2) براي بيوجذب کادميوم(II) در غلظتهاي اوليه ۵، ۱ و ۰/۵ ميلي مولار به ترتيب ۱/۰۷، ۰/۹۳ و ۰/۸۷ گرم بر ميلي مول بر دقيقه بدست آمد و ثابت سرعت معادله اشباع (k_0) براي بيوجذب کادميوم(II) در غلظتهاي اوليه ۵، ۱ و ۰/۵ ميلي مولار به ترتيب ۰/۰۰۱۱، ۰/۰۰۰۴ و ۰/۰۰۰۲ ميلي مولار بر دقيقه حاصل شد. با توجه به نتايج بدست آمده مشخص مي‌شود که با افزايش غلظت اوليه سرب(II) و کادميوم(II)، ثوابت سرعت بيوجذب افزايش مي‌يابد. بنابراين رابطه اي مستقيم بين سرعت بيوجذب سرب(II) و کادميوم(II) و غلظت اوليه اين فلزات وجود دارد؛ به عبارت ديگر، بيوجذب سرب(II) و کادميوم(II) بر روي جلبک قهوه‌اي سارگاسوم در غلظت اوليه بالاتر اين فلزات سرعت بيشتري دارد.

پايش pH در همه آزمايش‌ها نشان داد که همزمان با جذب سرب(II) و کادميوم(II)، يون هيدروژن از بيوجاذب آزاد و وارد محلول مي‌شود، زيرا با جذب سرب(II) و کادميوم(II)، pH محلول کاهش مي‌يابد؛ بطور مثال، در آزمايش‌هاي سينتيک، pH اوليه محلولهاي آزمايش در ۵ تنظيم شد و pH نهايي محلولها با غلظت اوليه سرب(II) ۵، ۱ و ۰/۵ ميلي مولار به ترتيب ۲/۵۳، ۳/۲۵ و ۳/۴۷ و pH نهايي محلولها با غلظت اوليه کادميوم(II) ۵، ۱ و ۰/۵ ميلي مولار به ترتيب ۳/۰۱، ۳/۵۱ و ۳/۷۵ بود. بدين ترتيب، پايش pH تعويض يون را به عنوان يکي از سازوکارهاي بيوجذب تأييد نمود.

نتايج برخي از مطالعات صورت گرفته بر روي بيوجذب فلزات سنگين توسط جلبکها، نشان دهنده نقش غالب تعويض يون در فرايند بيوجذب مي‌باشد. (Diniz and

Volesky 2005) نشان دادند که سازوکار اصلي بيوجذب لانتانيم(III)،يورووييم(III) و ايتربيم(III) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم پلي سيستم، تعويض آنها با يون کلسيم مي‌باشد. بيوجذب روي(II) بر روي اوسيلاتوريا انگوستيسيما (Oscillatoria anguistissima) همراه با آزادسازي يون منيزيم بود (Ahuja et al. 1999).

مطالعه ايزوترم : داده‌هاي آزمايش‌هاي ايزوترم بيوجذب، آناليز اين داده‌ها و تعيين مدل ايزوترم براي طراحي واحدهاي فرايندي بيوجذب لازم مي‌باشد (Aksu 2002). ايزوترم بيوجذب سرب(II) و کادميوم(II) از مدل ردليش- پيترسن تبعيت مي‌نمود (R^2>۰/۹۹). ساير مدلهاي ايزوترم نيز تطابق نسبتا خوبي با داده‌هاي آزمايشگاهي داشتند (R^2>۰/۹۳). ضريب همبستگي داده‌هاي آزمايشگاهي با مدل ايزوترم فروندليش- لانگموئر از ضريب همبستگي داده‌هاي آزمايشگاهي با هر دو مدل ايزوترم فروندليش و لانگموئر بيشتر مي‌باشد؛ به عبارت ديگر عملکرد مدل فروندليش- لانگموئر در مدل‌سازي نتايج آزمايش‌هاي ايزوترم بيوجذب سرب(II) و کادميوم(II) از هر دو مدل فروندليش و لانگموئر بهتر مي‌باشد. بر طبق معادله لانگموئر، حداکثر ظرفيت بيوجذب (q_m) سرب(II) و کادميوم(II) به ترتيب برابر: ۱/۷۰ و ۱/۰۲ ميلي مول بر گرم بدست آمد.

پارامتر حداکثر ظرفيت بيوجذب (q_m) معيار مناسبي جهت مقايسه بيوجاذب‌هاي مختلف مي‌باشد. (Volesky 2001).

از آنجا که مطالعات مختلف در شرايط آزمايشگاهي متفاوت (دما، pH و...) به انجام رسيده اند، مقايسه نتايج آنها با يکديگر مشکل مي‌باشد؛ اما حداکثر ظرفيت بيوجذب سرب(II) و کادميوم(II) که در اين پژوهش بدست آمد، بسيار بيشتر از ظرفيت جذب بيوجاذب‌هاي ديگر بوده است. بنابراين جلبک قهوه‌اي سارگاسوم مورد استفاده در اين پژوهش، به عنوان يک بيوجاذب با ظرفيت جذب بالا معرفي مي‌شود (جدول ۴).

نتيجه گيري

نتايج اين مطالعه نشان داد بيوجذب سرب(II) و کادميوم(II) بر روي جلبک قهوه‌اي سارگاسوم داراي سرعت بالايي است. پايش pH تعويض يون را به عنوان يکي از سازوکارهاي بيوجذب تأييد نمود. مطالعه ايزوترم بيوجذب نشان داد که بر طبق معادله لانگموئر، حداکثر ظرفيت بيوجذب (q_m) سرب(II) و کادميوم(II) به ترتيب ۱/۷۰ و ۱/۰۲ ميلي مول بر گرم است، بنابراين جلبک قهوه‌اي سارگاسوم يک بيوجاذب با ظرفيت جذب بالا براي سرب(II) و کادميوم(II) مي‌باشد. بدين ترتيب با انجام مطالعات بيشتر مي‌توان به طور عملي و در مقياس گسترده از اين جلبک که يکي از گونه‌هاي غالب در سواحل جنوبی کشورمان مي‌باشد، براي حذف فلزات سنگين از آب و فاضلاب استفاده نمود.

تشکر و قدردانی

اين پژوهش در قالب پايان‌نامه کارشناسي ارشد با حمايت مالي دانشکده بهداشت و انستيتو تحقيقات بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکي و خدمات بهداشتي درماني تهران انجام گرديده است. همچنين نويسندگان مقاله از پرسنل آزمايشگاههای گروه مهندسي بهداشت محيط تشکر و قدردانی مي‌کنند.

جدول ۱- پارامترهاي سینتیک معادلات سرعت درجه اول کاذب، درجه دوم کاذب، **Saturation** و درجه دوم براي بیوجذب Pb^{2+} و Cd^{2+} بوسیله جلبک فهوه‌اي سارگاسوم

یون فلزي	غلظت اولیه فلز (Mm)	معادله سرعت درجه اول کاذب			معادله سرعت درجه دوم کاذب			معادله سرعت اشباع			معادله سرعت درجه دوم		
		q_e ($mmolg^{-1}$)	k_1 (min^{-1})	R^{2*}	q_e ($mmolg^{-1}$)	k_2 ($gmmol^{-1}min^{-1}$)	R^2	K (Mm)	k_0 ($mMmin^{-1}$)	R^2	q_e ($mmolg^{-1}$)	k ($gmmol^{-1}min^{-1}$)	R^2
Pb^{2+}	۵	۰/۹۸	۰/۲۱	۰/۸۷۹	۰/۹۹	۱/۸۶	۱/۰۰۰	-۳/۸۸	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹۹	۰/۹۸	۴/۵۳	۰/۵۰۷
Pb^{2+}	۱	۱/۰۱	۰/۱۴	۰/۸۳۹	۱/۰۱	۰/۸۳	۱/۰۰۰	-۰/۸۰	۰/۰۰۱۰	۰/۹۹۸	۱/۰۱	۲/۴۳	۰/۷۸۲
Pb^{2+}	۰/۵	۱/۰۷	۰/۱۲	۰/۸۸۰	۱/۰۸	۰/۵۲	۱/۰۰۰	-۰/۴۰	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹۷	۱/۰۷	۰/۷۱	۰/۸۲۵
Cd^{2+}	۵	۰/۵۷	۰/۱۱	۰/۳۷۷	۰/۵۷	۱/۰۷	۱/۰۰۰	-۴/۴۶	۰/۰۰۱۱	۱/۰۰۰	۰/۵۷	۰/۹۸	۰/۹۶۲
Cd^{2+}	۱	۰/۶۵	۰/۱۳	۰/۸۱۷	۰/۶۶	۰/۹۳	۱/۰۰۰	-۰/۸۸	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۹	۰/۶۵	۱/۴۱	۰/۷۶۰
Cd^{2+}	۰/۵	۰/۷۹	۰/۱۲	۰/۴۶۴	۰/۷۹	۰/۸۷	۱/۰۰۰	-۰/۴۲	۰/۰۰۰۲	۱/۰۰۰	۰/۷۹	۰/۹۱	۰/۸۶۰

*R: ضریب همبستگي

جدول ۲- پارامترهاي مدلهاي ایزوترم لانگموئر و فروندلیش براي بیوجذب سرب(**II**) و کادمیوم(**II**) بوسیله جلبک فهوه‌اي سارگاسوم

یون فلزي	مدل لانگموئر			مدل فروندلیش		
	$q_m(mmolg^{-1})$	$b(Lmmol^{-1})$	R^{2*}	K_F	n	R^2
سرب(II)	۱/۷۰	۴/۴۷	۰/۹۳۱	۱/۲۱	۳/۸۸	۰/۹۳۷
کادمیوم(II)	۱/۰۲	۳/۷۲	۰/۹۷۰	۰/۷۱	۳/۰۰	۰/۹۴۹

*R: ضریب همبستگي

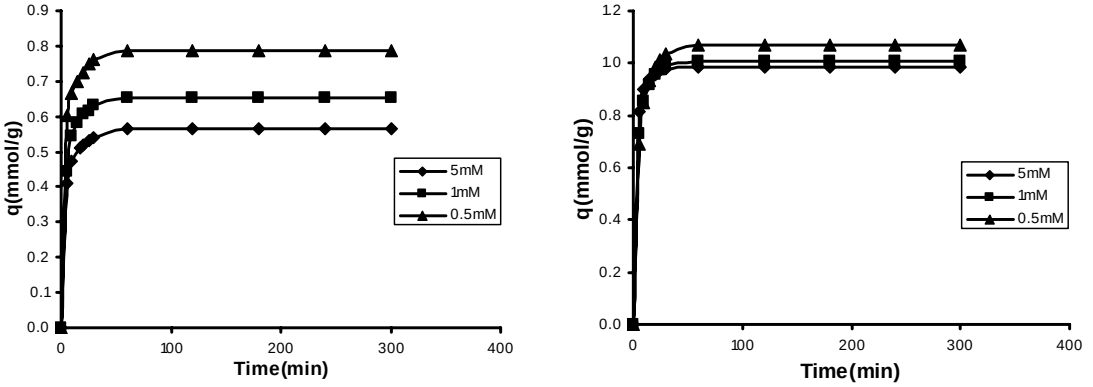
جدول ۳- پارامترهاي مدلهاي ايزوترم فروندليش – لانگموئر و ردليش- پيترسن براي بيوجذب سرب(**II**) و كادميوم(**II**) بوسيله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم

يون فلزي	مدل فروندليش- لانگموئر				مدل ردليش- پيترسن			
	q_m	b	n	R^{2*}	a_{RP} $(Lmmol^{-1})^{\beta}$	K_{RP} (Lg^{-1})	β	R^2
سرب(II)	۳/۸۱	۰/۴۷	۳/۲۴	۰/۹۴۸	۴۰۹/۴۵	۴۷۵/۳۰	۰/۸۳	۰/۹۹۹
كادميوم(II)	۱/۵۴	۰/۸۸	۲/۱۳	۰/۹۷۷	۴۰/۲۵	۲۹/۰۱	۰/۷۸	۰/۹۹۸

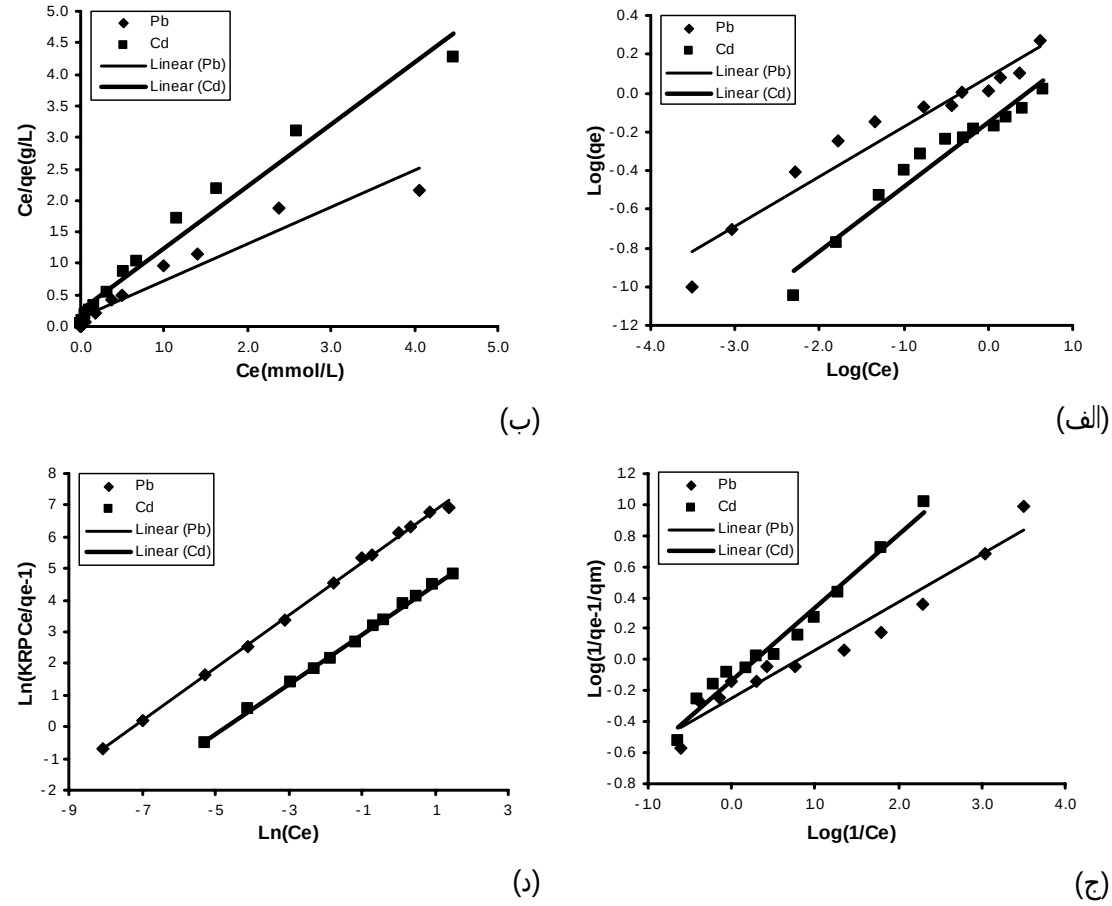
*R: ضريب همبستگي

جدول ۴- مقايسه حداكثر ظرفيت بيوجذب (**q_m**) سرب(**II**) و كادميوم(**II**) بوسيله بيوجاذب‌هاي مختلف

يون فلزي	بيو جاذب	نوع بيوجاذب	حداكثر ظرفيت جذب $q_m(mmolg^{-1})$	pH	دما (°C)	مرجع
Pb^{2+}	اكلونيا راديانا (Ecklonia radiata)	جلبک	۱/۳۶	٤/۵-۵/۵	-	Matheickal and Yu 1996
	اولوا (.Ulva sp)	جلبک	۱/٤۶	۵	۲۲±۱	Sheng et al. 2004
	پادينا (.Padina sp)	جلبک	۱/۲۵	۵	۲۲±۱	Sheng et al. 2004
	گلاسيلاريا (.Gracillaria sp)	جلبک	۰/٤۵	۵	۲۲±۱	Sheng et al. 2004
	كلادوفورا گلومراتا (Cladophora glomerata)	جلبک	۰/۳۵	٤/۵	۳۰	Jalali et al. 2002
	فانروچات چريسوسپوريوم (Phanerochaete chrysosporium)	قارچ	۰/٤۱	۶	۲۵	Say et al. 2001
	موكور روكسي (Mucor rouxii)	قارچ	۰/۲۶	۶	-	Yan and Viraraghavan 2003
	استريتومايسس ريموسوس (Streptomyces rimosus)	قارچ	۰/۶۶	-	-	Selatnia et al. 2004b
	پلوروتوس استراتوس (Pleurotus ostreatus)	گياه	۰/۵۸	۶/۵	۲۵	Xiangliang et al. 2005
	سارگاسوم	جلبک	۱/۷۰	۵	۲۰	اين مطالعه
Cd^{2+}	اولوا اونوي (Ulva onoi)	جلبک	۰/۸۱	۷/۸	۲۰	Suzuki et al. 2005
	اولوا (.Ulva sp)	جلبک	۰/۵۸	۵/۵	۲۲±۱	Sheng et al. 2004
	پادينا (.Padina sp)	جلبک	۰/۷۵	۵/۵	۲۲±۱	Sheng et al. 2004
	گلاسيلاريا (.Gracillaria sp)	جلبک	۰/۳۰	۵/۵	۲۲±۱	Sheng et al. 2004
	موكور روكسي (Mucor rouxii)	قارچ	۰/۱۸	۶	-	Yan and Viraraghavan 2003
	فانروچات چريسوسپوريوم (Phanerochaete chrysosporium)	قارچ	۰/۲۵	۶	۲۵	Say et al. 2001
	ترامتس ورسيكلر (Trametes versicolor)	قارچ	۱/۲۰	۶	۲۰	Yalçınkaya et al. 2002
	استريتومايسس ريموسوس (Streptomyces rimosus)	قارچ	۰/۵۸	۸	۲۰	Selatnia et al. 2004a
	كتين (Chitin)	-	۰/۱٤	۵/۸-۶/٤	۲۵	Benguella and Benaissa 2002
	سارگاسوم	جلبک	۱/۰۲	۵	۲۰	اين مطالعه



نمودار ۱- سینتیک بیوجذب سرب(**II**) (الف) و کادمیوم(**II**) (ب) بوسیله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم



نمودار ۲- مدل‌سازي ایزوترم بیوجذب سرب(**II**) و کادمیوم(**II**) بوسیله جلبک قهوه‌اي سارگاسوم با استفاده از مدل فروندلیش (الف)، لانگموئر (ب)، فروندلیش- لانگموئر (ج) و ردلیش- پیترسن (د)

References

Ahuja, P., Gupta, R. and Saxena, R.K., 1999. Zn^{2+} biosorption by Oscillatoria anguistissima. Process. *Biochem.* **34**, pp.77-85.

Aksu, Z., 2002. Determination of the equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters of the batch biosorption of nickel(II) ions onto Chlorella vulgaris. Process. *Biochem.* **38**, pp.89-99.

APAH, AWWA and WEF, 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. United Book Press, Baltimore, Maryland.

Azizian, S., 2004. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. *J. Coll. Interf. Sci.* **276**, pp.47-52.

Benguella, B. and Benaissa, H., 2002. Cadmium removal from aqueous solutions by chitin: kinetic and equilibrium studies. *Water Res.* **36**, pp.2463-2474.

Cossich, E.S., Tavares, C.R.G. and Ravagnani, T.M.K., 2002. Biosorption of chromium(III) by Sargassum sp. Biomass. *Electronic Journal of Biotechnol.* **5**(2), pp.133-140.

Davis, T.A., Volesky, B. and Mucci, A., 2003. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Res.* **37**(18), pp.4311-4330.

Diniz, V. and Volesky, B., 2005. Biosorption of La, Eu and Yb using Sargassum biomass. *Water Res.* **39**, pp.239-247.

Eckenfelder, W.W., Jr., 2000. Industrial Water Pollution Control. 3rd ed. McGraw-Hill Inc., *Boston, MA,* pp.138-142.

Jalali, R., Ghafourian, H., Asef, Y., Davarpanah, S.J. and Sepehr, S., 2002. Removal and recovery of lead using nonliving biomass of marine algae. *J. Hazard. Mater.* **B92**, pp.253-262.

Kiff, R.J. and Little, D.R., 1986. Biosorption of heavy metals by immobilized fungal biomass. In: Hunt E.H., ed, Immobilization of Ions by Biosorption. Ellis Horwood, *Chichster, UK*. p.219.

Kuyucak, N. and Volesky, B., 1989. Accumulation of cobalt by marine algae. *Biotechnol. Bioeng.* **33**, pp.809-814.

Loukidou, M.X., Matis, K.A., Zouboulis, A.I. and Kyriakidou, M.L., 2003. Removal of As(V) from wastewaters by chemically modified fungal biomass. *Water Res.* **37**, pp.4544-4552.

Loukidou, M.X., Zouboulis, A.I., Karapantsios, T.D. and Matis, K.A., 2004. Equilibrium and kinetic modeling of chromium(VI) biosorption by Aeromonas caviae. Colloids Surf. A: Physicochem. *Eng. Aspects.* **242**, pp.93-104.

Matheickal, J.T. and Yu, Q., 1999. Biosorption of lead(II) and copper(II) from aqueous solutions by pre-treated biomass of Australian marine algae. Biores. *Technol.* **69**(3), pp.223-229.

Matheickal, J.T. and Yu, Q., 1996. Biosorption of lead from aqueous solutions by marine algae Ecklonia adiate. *Water Sci. Technol.* **34**(9), 1-7.

Metcalf and Eddy Inc., 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th ed. McGraw-Hill Inc., *New York.* pp.260-265.

Say, R., Denizli, A. and Arıca, M.Y., 2001. Biosorption of cadmium(II), lead(II) and copper(II) with the filamentous fungus Phanerochaete chrysosporium. *Biores. Technol.* **76**, pp.67-70.

Selatnia, A., Bakhti, M.Z., Madani, A., Kertous, L. and Mansouri, Y., 2004a. Biosorption of Cd^{2+} from aqueous solution by a NaOH-treated bacterial dead Streptomyces rimosus biomass. *Hydrometallurgy.* **75**, pp.11-24.

Selatnia, A., Boukazoula, A., Kechid, N., Bakhti, M.Z., Chergui, A. and Kerchich, Y., 2004b. Biosorption of lead(II) from aqueous solution by a bacterial dead Streptomyces rimosus biomass. *Biochem. Eng. J.* **19**, pp.127-135.

Sheng, P.X., Ting, Y.P., Chen, J.P. and Hong, L., 2004. Sorption of lead, copper,

cadmium, zinc and nickel by marine algal biomass: characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanisms. *J. Coll. Interf. Sci.* **275**, pp.131-141.

Sternberg, S.P.K. and Dorn, R.W., 2002. Cadmium removal using Cladophora in batch, semi-batch and flow reactors. Biores. *Technol.* **81**, pp.249-255.

Suzuki, Y., Kametani, T. and Maruyama, T., 2005. Removal of heavy metals from aqueous solution by nonliving Ulva seaweed as biosorbent. *Water Res.* **39**, pp.1803-1808.

Volesky, B., 2001. Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy.* **59**, pp.203-216.

Volesky, B., 2003. Biosorption process simulation tools. *Hydrometallurgy.* **71**, pp.179-190.

Xiangliang, P., Jianlong, W. and Daoyong, Z., 2005. Biosorption of Pb(II) by Pleurotus ostreatus immobilized in calcium alginate gel. Process. *Biochem.* **40**, pp.2799-2803.

Yalçınkaya, Y., Soysal, L., Denizli, A., Arıca, M.Y., Bektaş, S. and Genç, Ö., 2002. Biosorption of cadmium from aquatic systems by carboxymethylcellulose and immobilized Trametes versicolor. *Hydrometallurgy.* **63**, pp.31-40.

Yan, G. and Viraraghavan, T., 2003. Heavy metal removal from aqueous solution by fungus Mucor rouxii. *Water Res.* **37**, pp.4486-4496.

Zhang, L., Zhao, L., Yu, Y. and Chen, C., 1998. Removal of lead from aqueous solution by non-living Rhizopus *nigricans. Water Res.* **32**, pp.1437-1444.