

بررسی جذب زیستی اورانیوم با استفاده از جلبک قهوه‌ای پادینا در یک سامانه جذب پیوسته

محمد حسن خانی، علی اصغر قربانپور خمسه*

پژوهشکده مواد اولیه و سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران، تهران، ایران

چکیده: با توجه به خطرهای زیست محیطی اورانیوم، اتخاذ روشی مناسب و موثر به منظور حذف این فلز سنگین از محلول‌های آبی بسیار مهم است. در این پژوهش جذب زیستی اورانیوم با استفاده از جلبک قهوه‌ای دریایی، گونه پادینا (*Padina sp.*) در یک سامانه جذب پیوسته مورد بررسی قرار گرفت. ستون مورد استفاده یک لوله شیشه‌ای با قطر داخلی ۱ cm و طول ۲۰ cm بود. تاثیر پارامترهای غلظت اولیه محلول، شدت جریان ورودی و ارتفاع بستر بر عملکرد ستون مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتیجه‌های به دست آمده در شرایط عملیاتی شدت جریان ورودی، ارتفاع بستر و غلظت اولیه محلول عبوری به ترتیب ۵ mL/min، ۸ cm و ۱۵۰ mg/L، نقطه شکست و اشباع در این سامانه به ترتیب در مدت زمان ۱/۵ و ۲۰ ساعت رخ داده و میزان ظرفیت جذب، ۳۷۲ mg/g جاذب به دست آمد. نتیجه‌های تجربی با استفاده از مدل‌های توماس و *BDST* برازش شد که هر دو مدل تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی نشان دادند. پارامترهای k_{TH} و q_m مدل توماس به ترتیب ۰/۰۰۲۰۸ L/hr.mg و ۴۴۹ mg/g به دست آمد. همچنین پارامترهای K_a و N_0 مدل *BDST* به ترتیب ۰/۰۰۲۰۸ L/hr.mg و ۷۲/۴۲ mg/cm³ به دست آمد. مطالعه‌های عملیات جذب و دفع در سه سیکل متوالی انجام گرفت. نتیجه‌ها نشان داد که جاذب پادینا توانایی جذب اورانیوم را با ظرفیت بالا در یک سامانه پیوسته دارد و از امکان احیا و استفاده مجدد برخوردار است.

واژگان کلیدی: جذب زیستی، اورانیوم، جلبک قهوه‌ای گونه پادینا، سامانه جذب پیوسته

KEYWORDS: Biosorption, Uranium, *Padina sp.* brown algae, Continuous sorption system

مقدمه

آلودگی که به علت آن به وجود می‌آید خطری جدی برای آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشد [۳]. با توجه به خطرهای زیست محیطی اورانیوم، اتخاذ روشی مناسب و موثر به منظور حذف این فلز سنگین از آب بسیار مهم است [۲]. اخیراً تلاش‌های زیادی بر روی مواد و فناوری‌های جدید برای جدا نمودن اورانیوم از محلول‌های آبی انجام گرفته است [۴]. تاکنون روش‌های بسیاری، از جمله رسوب شیمیایی، جداسازی غشایی، حذف زیستی، استخراج

پساب‌های صنایع گوناگون نظیر صنایع هسته‌ای، رنگ‌سازی، استخراج فلزها از معادن، باتری‌سازی و غیره دارای فلزهای سنگین می‌باشند [۱]. ورود این‌گونه فلزها به محیط‌زیست باعث ایجاد مشکل‌های فراوان برای موجودهای زنده می‌شود. اورانیوم به علت رادیواکتیویته، سمیت شیمیایی، نیمه‌عمر بالا و پرتوزایی یکی از مهم‌ترین فلزهای سنگین به شمار می‌آید [۵-۲]. اورانیوم از روش فعالیت‌های مرتبط با صنایع هسته‌ای وارد محیط‌زیست می‌شود و

*Email: akhamseh@aeoi.org.ir

*عهده‌دار مکاتبات

جذب پیوسته می‌باشد. زمان سرویس، مدت زمانی است که توسط منحنی‌های عبور (غلظت بر حسب زمان یا حجم عبوری از بستر) تعیین می‌شود. به طور معمول نقطه شکست را در غلظت خروجی ۵ درصد مقدار غلظت ورودی بستر و نقطه خستگی (اشباع کامل بستر) را در غلظت خروجی ۹۵ درصد مقدار غلظت ورودی به بستر، تعریف می‌کنند. ستون تا وقتی که به نقطه اشباع نرسیده است می‌تواند کار کند. نقاط شکست و اشباع در طراحی ستون مهم و تاثیرگذار هستند. همان‌گونه که بیان شد، عملکرد ستون‌های پیوسته در فرایند جذب توسط منحنی‌های عبور توصیف می‌شود که معمولاً به صورت S شکل هستند. منحنی‌های عبور تابعی از مشخصه‌های جریان ستون، جذب تعادلی و عامل‌های انتقال جرم می‌باشند. پارامترهای متفاوتی همانند طول ناحیه جذب، ظرفیت جذب، بازده جذب، شیب منحنی‌های عبور، شدت جریان ورودی، غلظت اولیه محلول و ارتفاع بستر جذب روی عملکرد ستون تأثیر می‌گذارد. جذب‌هایی بهتر هستند که نقطه شکست دیرتر، ظرفیت و بازده جذب بالاتر و فاصله زیاد بین نقطه شکست و اشباع داشته باشند. در حالت اشباع ستون، غلظت خروجی و ورودی بستر یکسان می‌شود و ستون کارایی خود را از دست می‌دهد که به منظور استفاده مجدد از ستون برای سیکل‌های متوالی لازم است عملیات دفع (شستشو) بر روی ستون انجام گیرد [۲۳، ۲۲]. طبیعی است که در سیکل‌های بعدی عملکرد ستون نسبت به سیکل اول کاهش پیدا می‌کند.

منطقه انتقال جرم (MTZ)

منطقه انتقال جرم در یک ستون بستر ثابت از معادله زیر به دست می‌آید.

$$Z_m = Z \left(1 - \frac{t_b}{t_e}\right) \quad (1)$$

در این معادله Z_m و Z به ترتیب ارتفاع ناحیه انتقال جرم و ارتفاع بستر می‌باشند. t_b و t_e نیز به ترتیب زمان نقطه شکست (وقتی که غلظت خروجی به ۵ درصد غلظت ورودی برسد) و زمان اشباع (زمانی که غلظت خروجی به ۹۵ درصد غلظت ورودی برسد) می‌باشند [۲۴].

ظرفیت جذب ستون بستر ثابت

برای به دست آوردن ظرفیت جذب در ستون، q_{exp} (mg/g)، ابتدا مساحت بالای نمودار منحنی عبور محاسبه شده و با ضرب کردن C_0 در این مقدار، میزان فلز جذب شده بر روی جاذب در طول ستون

با حلال، تصفیه الکتروشیمیایی، اسمز معکوس، تبادل یونی و جذب سطحی به طور گسترده برای حذف اورانیوم از محلول‌های آبی به کار برده شده‌اند [۶، ۴، ۲]. انواع متنوع و جدیدی از جاذب‌ها از جمله کربن اکتیو، زئولیت طبیعی و سنتز شده، نانوتیوب‌های کربن، آلومینا و سیلیکا، هماتیت (نوعی سنگ آهن)، ذره‌های ریز سیلیسی و توده‌های زنده گوناگون برای جذب اورانیوم مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۸، ۷]. در میان این روش‌ها، جذب سطحی به دلیل بازده بالا، در دسترس بودن جاذب‌های گوناگون و ویژگی‌های ساده عملیاتی یکی از موثرترین روش‌ها می‌باشد [۶، ۴].

جذب زیستی ویژگی یک نوع مشخصی از توده‌های میکروبی مرده است که در جذب فلزهای سنگین از محلول‌های آبی خیلی رقیق یکی از امید دهنده‌ترین روش‌ها است. مهم‌ترین برتری تکنولوژی جذب زیستی، تاثیر آن در کاهش سریع غلظت یون‌های فلزهای سنگین با بازده بالا و کم هزینه بودن است. هزینه‌های عملیاتی پایین، انتخاب‌پذیری، ظرفیت بالای جذب فلز و عدم تولید لجن‌های شیمیایی از جمله برتری‌های دیگر این روش است [۹-۱۱]. میکروارگانیزم‌های گوناگون شامل جلبک، باکتری، قارچ و ضایعات کشاورزی توانایی دفع فلزهای سنگین، گران‌بها و رادیواکتیو را دارند [۷، ۲۰-۱۲].

از نقطه نظر کاربردی توسعه مدل ریاضی برای تشریح رفتار تعادلی در یک سامانه جذب پیوسته به منظور استفاده در طراحی‌های صنعتی ضروری می‌باشد. در این راستا در کار حاضر ضمن ارزیابی توان و ظرفیت جاذب در جذب پیوسته اورانیوم با استفاده از جلبک پادینا و امکان احیا و استفاده مجدد آن مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین تاثیر پارامترهای عملیاتی گوناگون مانند غلظت اولیه محلول، شدت جریان ورودی و ارتفاع بستر بر عملکرد ستون مورد مطالعه قرار گرفته و مدل‌سازی ستون جذب به عنوان ابزار اولیه لازم برای طراحی برج‌های جذب زیستی مورد بررسی قرار گرفت.

تئوری

یکی از متداول‌ترین تجهیزات برای سیکل جذب - دفع در یک سامانه پیوسته، ستون بستر ثابت می‌باشد. استفاده بهینه از اختلاف غلظت بین ذره‌های جاذب و یون‌های باقی‌مانده در فاز مایع، دیگر برتری این سامانه است. سه عامل تاثیرگذار در فرایند ستون بستر ثابت وجود دارد که عبارتند از: تعادل جذب (واکنش)، انتقال جرم اجزاء جذب و مشخصه‌های جریان گذر کننده از بستر [۲۱]. علاوه بر این سه پارامتر، زمان سرویس نیز از فاکتورهای مهم در عملیات

مدل سازی فرایند جذب زیستی پیوسته

مدل سازی ریاضی و شبیه سازی کامپیوتری ابزار فوق العاده قوی برای پیشبرد پروژه جذب زیستی است. این کار برای طراحی و بهینه سازی فرایند ضروری می باشد. طراحی موفق یک ستون جذب نیازمند پیش بینی نمودار غلظت-زمان یا منحنی عبور برای جریان خروجی و بیشترین ظرفیت جذب است. برای مدل سازی فرایند جذب، مدل های متعددی ارائه شده است [۲۸]. با توجه به یکسان بودن اصول فرایند جذب زیستی با فرایندهای جذب سطحی، عموماً برای تحلیل و مدل سازی فرایند جذب زیستی نیز از مدل های موجود مربوط به جذب سطحی استفاده می شود. در این کار از مدل های توماس و BDST (Bed Depth Service Time) برای مدل سازی جذب پیوسته اورانیوم توسط جلبک قهوه‌ای پادینا استفاده شده است. مدل توماس بر اساس معادله بقای جرم و با این فرض که تعادل جذب از مدل لانگمویر با شرط عدم پراکندگی محوری پیروی می کند پایه گذاری شده است. این مدل می تواند با استفاده از اطلاعات تجربی پروفایل زمان و غلظت خروجی، منحنی شکست تئوری را پیش بینی نموده و براین اساس، مقدار فلز جذب شده به ازای واحد جرم جاذب در ستون را تعیین نماید. این مدل به صورت معادله (۵) است [۲۹].

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{Mq_0k_{TH}}{Q} - \frac{C_0k_{TH}t}{1000}\right)} \quad (5)$$

که در آن C_0 و C غلظت یون فلز به ترتیب در جریان ورودی و خروجی بر حسب میلی گرم بر لیتر (ppm) می باشند. k_{TH} ثابت توماس Q $l/(g \cdot min)$ شدت جریان q_0 بیشینه ظرفیت جذب M (mg/g) جرم جاذب (g) و t زمان (min) می باشد. فرم خطی شده معادله (۵) به شکل زیر است:

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_{TH}q_mM}{Q} - k_{TH}C_0t \quad (6)$$

k_{TH} ضریب نرخ جذب توماس و q_m ظرفیت جذب با ترسیم $\ln(C_0/C - 1)$ در برابر t تعیین می شود.

مدل BDST یک رابطه خطی بین زمان سرویس و عمق بستر برای پیش بینی ارتباط بین عمق بستر و زمان سرویس (زمان شکست) در نظر می گیرد که یکی از پارامترهای مهم در طراحی است که به صورت معادله (۷) بیان می شود [۲۴].

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t} - 1\right) = \ln\left(e^{(K_a \times N_0 \times Z)/v} - 1\right) - K_a \times C_0 \times t \quad (7)$$

به دست می آید. با تقسیم میزان فلز جذب شده به وزن جاذب مورد استفاده، ظرفیت جذب ستون به دست می آید که توسط معادله (۲) محاسبه می شود [۲۵].

$$q_{exp} = \frac{C_0}{M} \int_0^{V_E} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dV \quad (2)$$

در این معادله M وزن جاذب (g) ، V حجم محلول عبوری از ستون (L) ، V_E حجم کل محلول عبوری از ستون است که جاذب به حالت اشباع می رسد، C غلظت جریان خروجی از ستون (mg/L) و C_0 غلظت جریان ورودی به ستون (mg/L) می باشد.

همچنین مقدار کلی عبوری جذب شونده از ستون از معادله زیر به دست می آید [۲۶].

$$W_{total} = \frac{C_0 Q t_{total}}{1000} \quad (3)$$

درصد جذب کلی جذب شونده از تقسیم حاصل جمله $\int_0^{V_E} (1 - C/C_0) dV$ بر مجموع کلی فلز عبوری از ستون بستر ثابت به دست می آید. به عبارت دیگر درصد جذب فلز برابر مقدار فلز جذب شده به کل فلز گذرانده شده از ستون است. درصد جذب کلی (R) از معادله (۴) به دست می آید [۲۷].

$$R = \frac{M q_{exp}}{W_{total}} \times 100 \quad (4)$$

مکانیزم انتقال جرم جذب در ستون بستر ثابت

مکانیزم جذب روی سطح جاذب طی مرحله های زیر انجام می شود [۲۷].

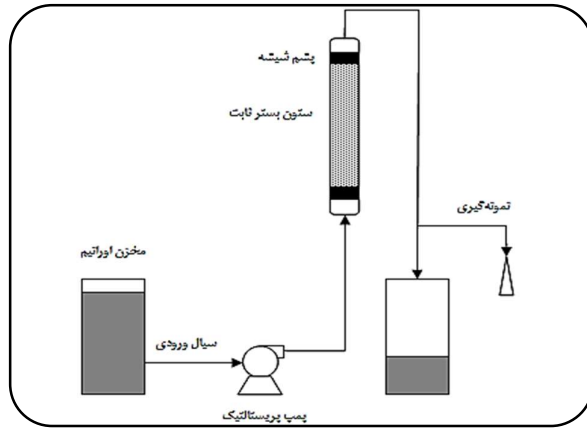
۱- انتقال جرم خارجی جذب شونده از توده سیال به سطح جاذب و سپس انتقال از میان یک فیلم نازک یا لایه مرزی به سطح خارجی جاذب

۲- انتقال جرم داخلی جذب شونده توسط نفوذ حفره های از سطح بیرونی جاذب به سطح داخلی ساختار متخلخل

۳- نفوذ سطحی در امتداد سطح جاذب

۴- جذب حل شونده روی سایت های جذب درون حفره ها جاذب نفوذ به همراه واکنش، مخصوص سامانه های جذب شیمیایی

است. برای جذب شیمیایی که در آن یک پیوند شیمیایی تشکیل می شود، سرعت مرحله ۴ پایین است و بنابراین این مرحله کنترل کننده است. با این وجود برای جذب فیزیکی مرحله ۴ بسیار سریع است، به این دلیل که این نوع از جذب فقط به تعداد برخوردها و برای برخورد مولکول ها به سطح بستگی دارد.



شکل ۱ - نمودار شماتیک ستون بستر ثابت

تهیه محلول‌های اورانیوم

محلول‌های اورانیوم با استفاده از رقیق‌سازی محلول مادر با غلظت ۱۰۰۰ mg/l تهیه شدند. محلول مادر با حل مقدار مشخصی از نمک نیترات اورانیل ($UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) خریداری شده از کمپانی مرک در آب مقطر تهیه شد. برای مطالعه ستونی غلظت اولیه محلول ۱۵۰ mg/l در نظر گرفته شد. با استفاده از تجربه‌های به‌دست آمده از مطالعه‌های پیشین [۳۴]، pH محلول با استفاده از اسید کلریدریک و سود ۰/۵ نرمال روی عدد ۴ تنظیم شد.

روش انجام آزمایش‌ها

عملیات جذب ستونی اورانیوم با استفاده از جلبک پادینا در یک سامانه پیوسته، در دمای محیط و در یک ستون شیشه‌ای با قطر داخلی ۱ cm و طول ۲۰ cm (شکل ۱) انجام گرفت. آزمایش‌های جذب به منظور بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی، شدت جریان ورودی از ۳ تا ۸ ml/min، ارتفاع بستر از ۶ تا ۱۰ cm و غلظت اولیه محلول اورانیوم از ۱۰۰ تا ۲۰۰ mg/l انجام شد. در بازه‌های زمانی از پیش تعیین شده از محلول عبوری نمونه‌گیری شده و نمونه‌ها پس از تصفیه و رقیق‌سازی لازم با استفاده از دستگاه ICP (OES Perkins Elmer Optima 2000 DV) آنالیز شد. تمامی آزمایش‌ها به منظور کم کردن خطا دو بار انجام و میانگین داده گزارش شده است.

نتیجه‌ها و بحث

اثر شدت جریان ورودی

برای بررسی اثر شدت جریان محلول عبوری بر عملکرد ستون جذب، آزمایش‌ها در سه شدت جریان ۳، ۵ و ۸ mL/min، در ارتفاع

در این معادله C_0 غلظت ورودی (mg/l)، C_t غلظت در زمان t (mg/l)، N_0 ظرفیت جذب تعادلی حجمی (mg/cm^3)، v سرعت خطی (cm/h) و K_a ثابت سرعت ($l/(mg \cdot h)$) می‌باشد. بنابراین با رسم زمان سرویس بر حسب ارتفاع بستر، خط راستی به‌دست می‌آید که از شیب خط N_0 و از عرض از مبدا آن K_a به‌دست می‌آید. به منظور آنالیز خطا و برای مقایسه نتیجه‌های آزمایشگاهی با داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل، علاوه بر ضریب همبستگی (R^2) می‌توان از درصد متوسط خطا ($\varepsilon\%$) که مربوط به تطابق نتیجه‌های آزمایشگاهی با داده‌های پیش‌بینی شده از طریق مدل است و به صورت معادله (۸) تعریف می‌شود، استفاده نمود [۳۰].

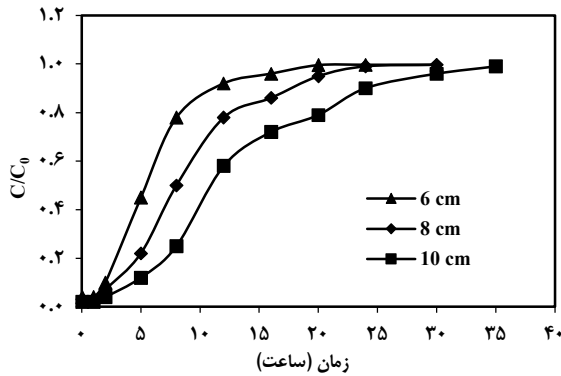
$$\varepsilon\% = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{\left(\frac{C}{C_0}\right)_{exp} - \left(\frac{C}{C_0}\right)_{model}}{\left(\frac{C}{C_0}\right)_{exp}} \right|}{N} \times 100 \quad (8)$$

در این معادله اندیس exp مربوط به داده‌های آزمایشگاهی، اندیس mod مربوط به مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و N تعداد داده‌ها است. در مواردی که $\varepsilon < 5\%$ باشد، می‌توان گفت که مدل مورد نظر تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد [۲۲].

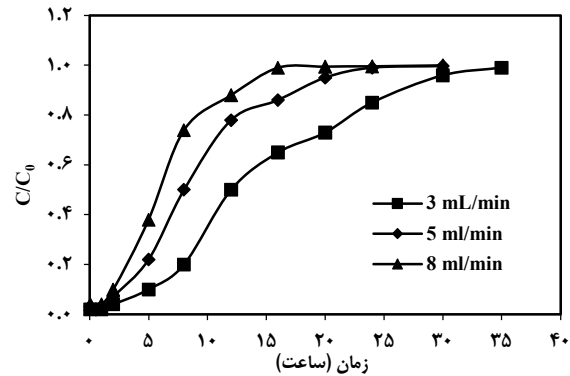
مواد و روش‌ها

تهیه جاذب

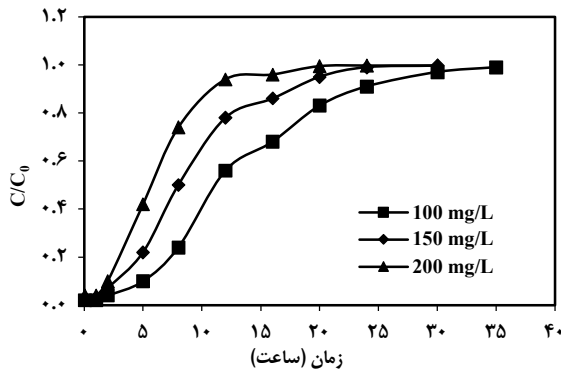
جاذب Padina sp. (نوعی جلبک قهوه‌ای دریایی جمع‌آوری شده از سواحل دریای عمان در بندر چابهار) با آب مقطر شستشو داده شده و با استفاده از نور آفتاب و سپس یک آون در دمای ۵۰ درجه سلسیوس خشکانده و سپس با استفاده از یک خرد کن مکانیکی خرد شده و با استفاده از یک الک استاندارد دانه بندی آن انجام شد و ذره‌های ۱ تا ۱/۲۵ میلی‌متری برای اصلاح با اسید انتخاب شد. اصلاح جاذب با استفاده از اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال به مدت ۱۲ ساعت با هم‌زدن آرام صورت گرفت. در اثر پیش تصفیه جاذب با اسید کلریدریک، جایگزینی یون‌های H^+ در سایت‌های اتصال جاذب موجب فعال شدن بیش‌تر سایت‌ها برای جذب یون‌های اورانیومی شده و بنابراین ظرفیت جذب آن به دلیل جایگزینی آسان یون‌های اورانیوم با پروتون‌ها افزایش می‌یابد. تاثیر مشابهی در مطالعه‌های دیگر نیز مشاهده شده است [۳۱-۳۳، ۴]. سپس جاذب با آب دی‌یونیزه چندین بار شستشو داده شد تا pH محلول عبوری به مقدار ثابتی رسید. جاذب شستشو داده شده در آون در دمای ۵۰ درجه سلسیوس خشک شده و به منظور استفاده در آزمایش‌های جذب نگهداری شد.



شکل ۳ - منحنی‌های عملکرد جذب ستونی اورانیوم توسط جلبک پادینا در ارتفاع بسترهای گوناگون (غلظت اولیه 150 mg/l و شدت جریان ورودی 5 ml/min)



شکل ۲ - منحنی‌های عملکرد جذب ستونی اورانیوم توسط جلبک پادینا در شدت جریان‌های ورودی گوناگون (غلظت اولیه 150 mg/l و ارتفاع بستر 8 cm)



شکل ۴ - منحنی‌های عملکرد جذب ستونی اورانیوم توسط جلبک پادینا در غلظت‌های اولیه گوناگون (شدت جریان ورودی 5 ml/min و ارتفاع بستر 8 cm)

بستر جاذب 8 cm و غلظت محلول اورانیوم ورودی 150 mg/L انجام شد. شکل ۲ منحنی‌های عبور محلول دارای اورانیوم را نشان می‌دهد. مطابق این شکل نقطه شکست و اشباع برای شدت جریان‌های 3 ، 5 و 8 mL/min به ترتیب در 2 و 28 ساعت، $1/5$ و 20 ساعت و 1 و 15 ساعت رخ می‌دهد. چنان‌چه دیده می‌شود با افزایش شدت جریان، زمان شکست و زمان اشباع کمتر شده است. با افزایش شدت جریان محلول اورانیوم عبوری و متعاقباً کاهش زمان اشباع، محلول زمان کافی برای رسیدن به تعادل با جاذب ستون را نخواهد داشت. از طرف دیگر با کاهش شدت جریان، مقدار محلول عبوری از ستون کمتر بوده و بازدهی کلی عملیات جذب پایین می‌آید. بنابراین در شدت جریان متوسط ضمن بالا بودن مقدار محلول عبوری از ستون، زمان کافی نیز برای رسیدن به تعادل با جاذب را دارد.

اثر غلظت اولیه محلول

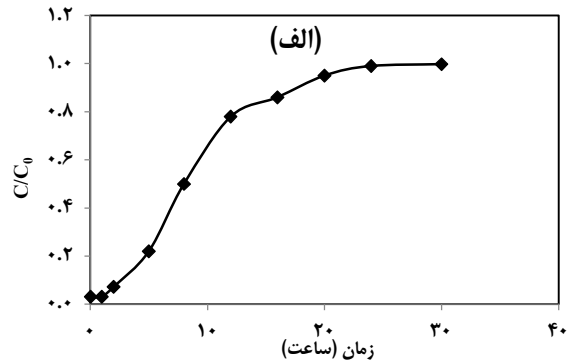
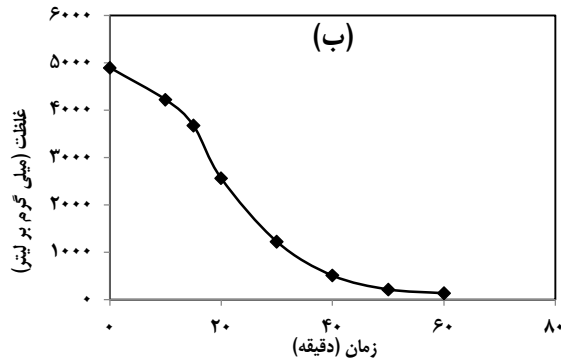
شکل ۴ منحنی‌های عبور محلول دارای اورانیوم در غلظت‌های اولیه گوناگون با شدت جریان ورودی 5 ml/min و ارتفاع بستر 8 cm را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر چه غلظت اولیه یون اورانیوم در محلول ورودی به ستون کمتر باشد، منحنی شکست کشیده‌تر و شیب نمودار شکست کمتر شده و نقاط شکست و اشباع ستون در زمان‌های طولانی‌تری اتفاق می‌افتد که دلیل این پدیده کاهش نیروی محرکه جذب در غلظت‌های پایین‌تر می‌باشد.

بررسی امکان احیا و استفاده مجدد

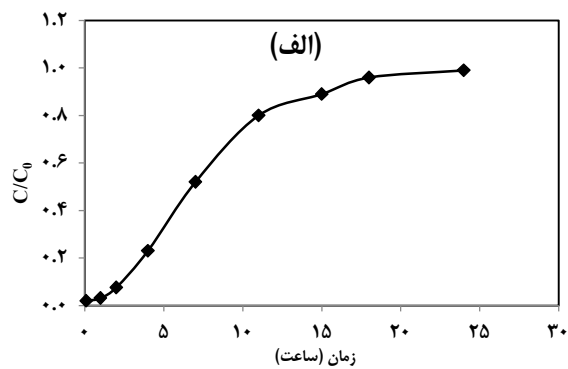
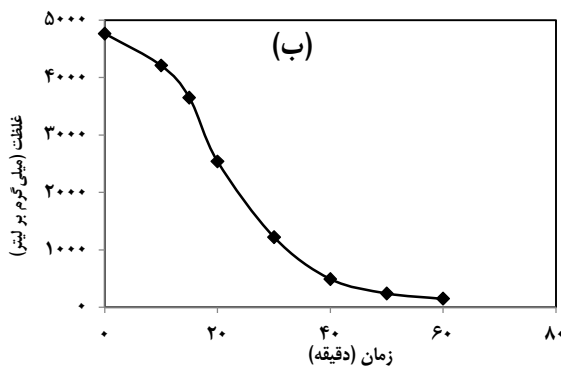
برای مطالعه امکان احیا و استفاده مجدد از این جاذب در سیکل‌های متوالی برای جذب اورانیوم، آزمایش‌های جذب ستونی در شرایط عملیاتی شدت جریان ورودی، ارتفاع بستر و غلظت اولیه محلول

اثر ارتفاع بستر

برای بررسی اثر ارتفاع بستر بر عملکرد ستون جذب، آزمایش‌ها در سه ارتفاع 6 ، 8 و 10 cm ، در شدت جریان 5 mL/min و غلظت محلول اورانیوم ورودی 150 mg/L انجام شد. مقدارهای انتخاب شده برای میزان جاذب به گونه‌ای انتخاب شده است تا ارتفاع بستر جاذب بزرگ‌تر از دو برابر قطر ستون باشد و از ایجاد پدیده کانالیزه شدن جریان محلول در ستون جلوگیری شود. منحنی‌های عبور به دست آمده در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش ارتفاع بستر زمان شکست و زمان اشباع بیشتر شده و شیب نمودار کمتر می‌شود. این موضوع به دلیل وجود جایگاه‌های پیوندی بیشتر جاذب در ارتفاع‌های بیشتر است. همچنین در این حالت منطقه انتقال جرم بزرگ‌تر می‌شود که امر این باعث شیب کمتر نمودار می‌شود.



شکل ۵ - منحنی‌های عملکرد (الف) جذب ستونی اورانیوم توسط جلبک پادینا (غلظت اولیه ۱۵۰ mg/l، ارتفاع بستر ۸ cm و شدت جریان ورودی ۵ ml/min) و (ب) شستشوی بستر پس از خاتمه فرایند جذب توسط اسید کلریدریک ۱٪ نرمال با شدت جریان ۵ ml/min (سیکل اول)



شکل ۶ - منحنی‌های عملکرد (الف) جذب ستونی اورانیوم توسط جلبک پادینا (غلظت اولیه ۱۵۰ mg/l، ارتفاع بستر ۸ cm و شدت جریان ورودی ۵ ml/min) و (ب) شستشو توسط اسید کلریدریک ۱٪ نرمال با شدت جریان ۵ ml/min به منظور بازیابی اورانیوم و باز تولید جاذب (سیکل دوم)

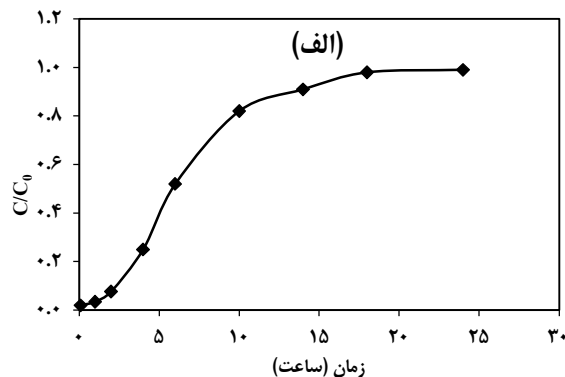
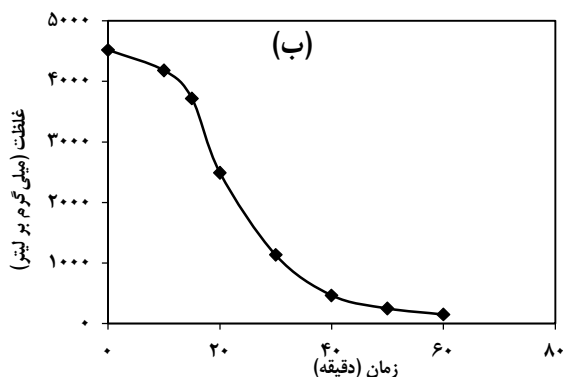
مدل‌سازی منحنی شکست

مدل‌سازی فرایند جذب ستونی اورانیوم توسط جلبک پادینا توسط مدل‌های توماس و BDST انجام گرفت. داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های ستون جاذب در شرایط عملیاتی شدت جریان ورودی، ارتفاع بستر و غلظت اولیه محلول عبوری به ترتیب ۵ ml/min، ۸ cm و ۱۵۰ mg/L با استفاده از فرم خطی مدل توماس معادله (۶) برازش شد و پارامترهای دینامیکی ستون جذب اورانیوم توسط جلبک پادینا استخراج شد. بر این اساس پارامترهای این مدل، k_{TH} و q_m ، به ترتیب ۰/۰۰۲۰۸ L/hr.mg و ۴۴۹ mg/g به‌دست آمد. مطابق شکل ۸ از آن جایی که ضریب رگرسیون (R^2) بالای ۹۸ درصد و همچنین ϵ (مقدار متوسط خطا) برابر ۱۶/۹۹ درصد و کمتر از ۵۰ درصد است، می‌توان گفت که مدل توماس تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارد.

همچنین داده‌های تجربی این مطالعه با استفاده از مدل BDST معادله (۷) نیز مورد برازش قرار گرفت. بر این اساس مقادیر پارامترهای

عبوری به ترتیب ۵ ml/min، ۸ cm و ۱۵۰ mg/L و در سه سیکل انجام گرفت که نتیجه‌های آن در شکل‌های ۵ تا ۷ آورده شده است. پس از اشباع ستون در سیکل اول، عملیات شستشو به منظور بازیابی جاذب و استفاده مجدد در سیکل دوم، با استفاده از اسید کلریدریک ۱٪ نرمال با شدت جریان ۵ ml/min انجام گرفت [۳۱، ۲۴]. شکل ۵ الف و ب به ترتیب عملیات جذب و شستشو (احیا) را در سیکل اول نشان می‌دهد. بر اساس نتیجه‌های به‌دست آمده از شکل ۵-الف میزان ظرفیت جذب ستون مطابق معادله (۲) برابر ۳۷۲ mg/g محاسبه شد. همچنین مطابق شکل ۵-ب ستون پس از گذشت یک ساعت از عملیات دفع عاری از اورانیوم شده و برای استفاده در سیکل دوم آماده است.

مطابق شکل‌های ۶ و ۷ نقطه شکست و اشباع ستون در سیکل‌های دوم و سوم تقریباً مشابه سیکل اول (به ترتیب در ۱ و ۲۰ ساعت) است که این امر حاکی از آن است که جاذب پادینا از امکان احیا و استفاده مجدد برای جذب پیوسته اورانیوم برخوردار است. زمان لازم برای عملیات احیا در هر سه سیکل حدود یک ساعت به‌دست آمد.

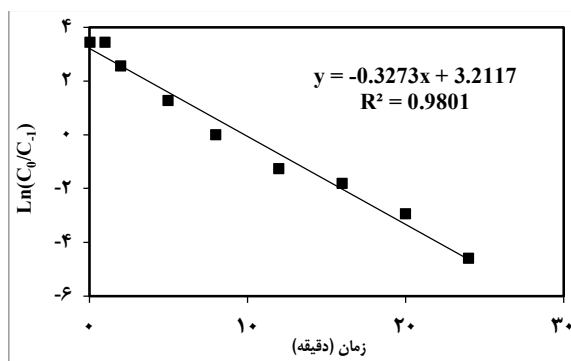


شکل ۷ - منحنی‌های عملکرد (الف) جذب ستونی اورانیوم توسط جلبک پادینا (غلظت اولیه ۱۵۰ mg/l، ارتفاع بستر ۸ cm و شدت جریان ورودی ۵ ml/min) و (ب) ششسو توسط اسید کلریدریک ۱/۱ نرمال با شدت جریان ۵ ml/min به منظور بازیابی اورانیوم و بازتولید جاذب (سیکل سوم)

میزان ظرفیت جذب جلبک قهوه‌ای پادینا برای جذب اورانیوم بیش تر از جلبک قهوه‌ای سیستوسیرا می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش جلبک پادینا به عنوان جاذب برای جذب و دفع اورانیوم از محلول‌های آبی در یک ستون بستر ثابت مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. تاثیر پارامترهای عملیاتی غلظت اولیه محلول، شدت جریان ورودی و ارتفاع بستر بر عملکرد ستون مورد مطالعه قرار گرفت. جلبک پادینا به عنوان جاذبی با قابلیت جذب بالا (ظرفیت جذب ۳۷۲ mg/g و نقطه شکست و اشباع به ترتیب ۱/۵ و ۲۰ ساعت) برای تصفیه محلول‌های دارای اورانیوم کارایی بالایی از خود نشان داد. نتیجه‌های به دست آمده از مدل‌سازی جذب ستونی اورانیوم با استفاده از جلبک پادینا نشان داد که مدل‌های توماس و BDST تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارند. همچنین آزمایش‌های جذب ستونی در سه سیکل متوالی نشان داد که جاذب پادینا از امکان احیا و استفاده مجدد برای جذب پیوسته اورانیوم برخوردار است. با توجه به هزینه پایین و در دسترس بودن جلبک پادینا، این جاذب قابلیت استفاده برای حذف اورانیوم از پساب‌های صنعتی دارد.



شکل ۸ - برازش داده‌های تجربی (■) جذب ستونی با مدل توماس (-)

N_0 و K_a به ترتیب برابر 0.0208 L/hr.mg و $72/42 \text{ g/cm}^3$ به دست آمد. با توجه به R^2 بالا (۰/۹۸) و ϵ برابر ۱۶/۹۹، این مدل توانایی این را خواهد داشت که نتیجه‌های تجربی را به خوبی پیش‌بینی کند. مطابق نتیجه‌های به دست آمده از این مطالعه بیش‌ترین ظرفیت جذب ۴۴۹ mg/g به دست آمد که با مقایسه آن با نتیجه‌های مطالعه جذب در سامانه ناپیوسته پیشین (۴۳۰ mg/g) [۳۲] دیده می‌شود که تفاوت چندان زیادی در بیش‌ترین ظرفیت جذب در سامانه پیوسته و ناپیوسته وجود ندارد که نشان می‌دهد عملیات هم‌زدن در سامانه ناپیوسته که به منظور کاهش مقاومت مربوط به نفوذ خارجی می‌باشد تاثیر چندانی نداشته است. به عبارت دیگر نفوذ خارجی در جذب اورانیوم با استفاده از جلبک قهوه‌ای پادینا، به عنوان مرحله کنترل کننده فرایند نمی‌باشد.

همچنین مقایسه نتیجه‌های این پژوهش با نتیجه‌های جذب اورانیوم توسط جلبک قهوه‌ای سیستوسیرا در سامانه پیوسته با بیش‌ترین ظرفیت جذب ۳۱۸ mg/g [۲۴]، بیانگر آن است که

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

مراجع

- [1] Aksu Z., [Equilibrium and Kinetic Modelling of Cadmium \(Ii\) Biosorption by C. Vulgaris in a Batch System: Effect of Temperature](#), *Separation and Purification Technology*, **21(3)**: 285-294 (2001).
- [2] Gök C., Aytas S., Sezer H., [Modeling Uranium Biosorption by Cystoseira Sp. And Application Studies](#), *Separation Science and Technology*, **52(5)**: 792-803 (2017).
- [3] Kalin M., Wheeler W., Meinrath G., [The Removal of Uranium from Mining Waste Water Using Algal/Microbial Biomass](#), *Journal of environmental radioactivity*, **78(2)**: 151-177 (2005).
- [4] Khani M., Keshtkar A., Ghannadi M., Pahlavanzadeh H., [Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Study of the Biosorption of Uranium onto Cystoseria Indica Algae](#), *Journal of Hazardous Materials*, **150(3)**: 612-618 (2008).
- [5] Yi Z.-j., Yao J., Zhu M.-j., Chen H.-l., Wang F., Yuan Z.-m., Liu X., [Batch Study of Uranium Biosorption by Elodea Canadensis Biomass](#), *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **310(2)**: 505-513 (2016).
- [6] Hassan Khani M., Reza Keshtkar A., Meysami B., Firouz Zarea M., Jalali R., [Biosorption of Uranium from Aqueous Solutions by Nonliving Biomass of Marinealgae Cystoseira Indica](#), *Electronic Journal of Biotechnology*, **9(2)**: (2006).
- [7] Farhan S.N., Khadom A.A., [Biosorption of Heavy Metals from Aqueous Solutions by Saccharomyces Cerevisiae](#), *International journal of industrial chemistry*, **6(2)**: 119-130 (2015).
- [8] Gupta V., Carrott P., Ribeiro Carrott M., [Suhas. Low-Cost Adsorbents: Growing Approach to Wastewater Treatment—a Review](#), *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **39(10)**: 783-842 (2009).
- [9] Ali I., Gupta V., [Advances in Water Treatment by Adsorption Technology](#), *Nature protocols*, **1(6)**: 2661-2667 (2006).
- [10] Gupta V., Shrivastava A., Jain N., [Biosorption of Chromium \(VI\) from Aqueous Solutions by Green Algae Spirogyra Species](#), *Water research*, **35(17)**: 4079-4085 (2001).
- [11] Gupta V.K., Rastogi A., Nayak A., [Adsorption Studies on the Removal of Hexavalent Chromium from Aqueous Solution Using a Low Cost Fertilizer Industry Waste Material](#), *Journal of Colloid and Interface Science*, **342(1)**: 135-141 (2010).
- [12] Anayurt R.A., Sari A., Tuzen M., [Equilibrium, Thermodynamic and Kinetic Studies on Biosorption of Pb \(II\) and Cd \(II\) from Aqueous Solution by Macrofungus \(Lactarius Scrobiculatus\) Biomass](#), *Chemical Engineering Journal*, **151(1-3)**: 255-261 (2009).
- [13] Bano A., Hussain J., Akbar A., Mehmood K., Anwar M., Hasni M.S., Ullah S., Sajid S., Ali I., [Biosorption of Heavy Metals by Obligate Halophilic Fungi](#), *Chemosphere*, **199**: 218-222 (2018).
- [14] Fadel M., Hassanein N.M., Elshafei M.M., Mostafa A.H., Ahmed M.A., Khater H.M., [Biosorption of Manganese from Groundwater by Biomass of Saccharomyces Cerevisiae](#), *Hbrc Journal*, **13(1)**: 106-113 (2017).

- [15] Pyrzyńska K., [Removal of Cadmium from Wastewaters with Low-Cost Adsorbents](#), *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **7(1)**: 102795 (2019).
- [16] Romero-Cano L.A., González-Gutiérrez L.V., Baldenegro-Pérez L.A., Carrasco-Marín F., [Grapefruit Peels as Biosorbent: Characterization and Use in Batch and Fixed Bed Column for Cu \(II\) Uptake from Wastewater](#), *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **92(7)**: 1650-1658 (2017).
- [17] Vendruscolo F., da Rocha Ferreira G.L., Antoniosi Filho N.R., [Biosorption of Hexavalent Chromium by Microorganisms](#), *International Biodeterioration & Biodegradation*, **119**: 87-95 (2017).
- [۱۸] محمدی‌ها م، امانی ح، کریمی نژاد ح، بررسی جذب بیولوژیکی فلزهای سنگین روی و کبالت توسط قارچ غیر زنده Ptcc 5270 *Phanerochaet Crysosperium*، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۸(۱)**: ۳۰۱ تا ۳۰۸ (۱۳۹۸).
- [۱۹] حسنی سردارآبادی م، میرزایی م، مطالعه تجربی و نظری جذب یون مس (II) در یک بستر ثابت پر شده با دانه‌های هیدروژل، با خوراک‌دهی شعاعی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۴۰(۱)**: ۱۴۷ تا ۱۵۶ (۱۴۰۰).
- [۲۰] شریفی فرد ح، لشنی زادگان ا، هاشمی ز، مدل‌سازی انتقال جرم فرآیند جذب سطحی کادمیم با کربن فعال سنتز شده از تفاله انگور، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۹(۳)**: ۱۷۱ تا ۱۸۳ (۱۳۹۹).
- [21] Volesky B., [Sorption and Biosorption](#), Montreal-St. Lambert, Quebec, Canada, *BV Sorbex Inc*, **11**: 258-263 (2003).
- [22] Naddafi K., Nabizadeh R., Saeedi R., Mahvi A.H., Vaezi F., Yaghmaeian K., Ghasri A., Nazmara S., [Biosorption of Lead \(Ii\) and Cadmium \(Ii\) by Protonated Sargassum Glaucescens Biomass in a Continuous Packed Bed Column](#), *Journal of Hazardous Materials*, **147(3)**: 785-791 (2007).
- [23] Vijayaraghavan K., Jegan J., Palanivelu K., Velan M., [Biosorption of Copper, Cobalt and Nickel by Marine Green Alga Ulva Reticulata in a Packed Column](#), *Chemosphere*, **60(3)**: 419-426 (2005).
- [24] Ghasemi M., Keshtkar A.R., Dabbagh R., Safdari S.J., [Biosorption of Uranium \(VI\) from Aqueous Solutions by Ca-Pretreated Cystoseira Indica Alga: Breakthrough Curves Studies and Modeling](#), *Journal of Hazardous Materials*, **189(1-2)**: 141-149 (2011).
- [25] Chatterjee A., Schiewer S., [Biosorption of Cadmium \(II\) Ions by Citrus Peels in a Packed Bed Column: Effect of Process Parameters and Comparison of Different Breakthrough Curve Models](#), *CLEAN-Soil, Air, Water*, **39(9)**: 874-881 (2011).
- [26] Malkoc E., Nuhoglu Y., [Removal of Ni \(II\) Ions from Aqueous Solutions Using Waste of Tea Factory: Adsorption on a Fixed-Bed Column](#), *Journal of Hazardous Materials*, **135(1-3)**: 328-336 (2006).
- [27] Seader J.D., Henley E.J., Roper D.K., "Separation Process Principles", John Wiley & Sons, (1998).

- [28] Park D., Yun Y.-S., Park J.M., [The Past, Present, and Future Trends of Biosorption, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, **15\(1\)**: 86-102 \(2010\).](#)
- [29] Baral S., Das N., Ramulu T., Sahoo S., Das S., Chaudhury G.R., [Removal of Cr \(VI\) by Thermally Activated Weed *Salvinia Cucullata* in a Fixed-Bed Column, *Journal of Hazardous Materials*, **161\(2-3\)**: 1427-1435 \(2009\).](#)
- [30] Aksu Z., Gönen F., [Biosorption of Phenol by Immobilized Activated Sludge in a Continuous Packed Bed: Prediction of Breakthrough Curves, *Process Biochemistry*, **39\(5\)**: 599-613 \(2004\).](#)
- [31] Ghasemi M., Keshtkar A., Dabbagh R., JABER S.S., [Biosorption of Uranium in a Continuous Flow Packed Bed Column Using *Cystoseira Indica* Biomass, *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, **8\(1\)**: 65-74 \(2011\).](#)
- [32] Khani M.H., [Uranium Biosorption by *Padina* Sp. Algae Biomass: Kinetics and Thermodynamics, *Environmental Science and Pollution Research*, **18\(9\)**: 1593 \(2011\).](#)
- [33] Yang J., Volesky B., [Biosorption of Uranium on *Sargassum* Biomass, *Water research*, **33\(15\)**: 3357-3363 \(1999\).](#)
- [34] Khani M.H., [Statistical Analysis and Isotherm Study of Uranium Biosorption by *Padina* Sp. Algae Biomass, *Environmental Science and Pollution Research*, **18\(5\)**: 790-799 \(2011\).](#)