

مقایسه کارایی دو نوع پوست بادام در حذف جیوه از محلول‌های آبی

شکوه‌السادات خالو^{۱*}؛ شهرام وثوقی^۲؛ رضا غلام‌نیا^۲

چکیده

زمینه: جیوه از فلزات سنگین با سمیت زیاد است که با توجه به کاربردهای فراوان، از مسیرهای گوناگون وارد محیط زیست می‌گردد. لذا، حذف آن از فاضلاب از چالش‌های مهم می‌باشد. در این تحقیق ابتدا حذف جیوه از محلول آبی با استفاده از دو نوع پوست بادام مورد بررسی و سپس کارایی این دو نوع جاذب با یکدیگر مقایسه گردید.

روش‌ها: این تحقیق از نوع تجربی- مداخله‌ای است. ابتدا نمونه‌های پوست بادام تهیه و آماده‌سازی شد. سپس پارامترهای مؤثر بر فرایند جذب جیوه از جمله pH، میزان جاذب، غلظت اولیه یون و زمان تماس مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفت. کارایی دو نوع پوست بادام از طریق آزمون آماری F و t مقایسه گردید.

یافته‌ها: بیشترین میزان حذف جیوه در $pH=5/5 \pm 0/1$ و در ۱۰ دقیقه اول تماس صورت گرفت. ماکزیم ظرفیت جذب مطابق با مدل ایزوترم لانگمویر برای پوست سخت و نرم به ترتیب (به‌ازای ۵ و ۷ گرم بر لیتر جاذب) برابر با $135/13 \pm 8/34$ و $105/30 \pm 7/92$ میلی‌گرم جیوه بر گرم جاذب محاسبه شد که از لحاظ آماری ($P=0/0005$) این اختلاف معنادار است.

نتیجه‌گیری: هرچند هر دو جاذب در مقایسه با دیگر جاذب‌های طبیعی، کارایی بالایی در حذف جیوه از محلول‌های آبی دارند، بررسی‌های آماری نشان داد ظرفیت جذب جیوه توسط پوست سخت بیشتر از پوست نرم است. پوست بادام به‌عنوان یک جاذب ارزان، در دسترس و بدون تولید مواد جانبی مضر به صنایعی که دارای فاضلاب حاوی جیوه هستند پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه‌ها: جیوه، جاذب طبیعی، پوست بادام، محلول‌های آبی، لانگمویر

«دریافت: ۱۳۹۱/۶/۱۴ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۳»

۱. گروه علوم پایه، دانشکده سلامت، ایمنی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

۲. گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده سلامت، ایمنی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

* عهده‌دار مکاتبات: حکیمیه تهرانپارس، بلوار نور، جنب پارک ساحل، دانشکده سلامت، ایمنی و محیط زیست. تلفن: ۶۵-۷۷۳۰۹۹۶۱-۰۲۱ داخلی: ۲۶۰۰

Email: Sh_khaloo@yahoo.com

مقدمه

فسیلی و دفع مواد زاید صنایع، به محیط زیست وارد می‌شود. پیامد آلودگی جیوه در آب یک تهدید جدی برای اکوسیستم‌های طبیعی می‌باشد. متدها و تکنیک‌های زیادی برای حذف جیوه مورد استفاده قرار گرفته که از آن جمله می‌توان به فرایندهای تجزیه زیستی (۲)، پلاسمای سرد (۳)، نانوکامپوزیت‌ها (۴)، تبادل یونی (۵)، کواگولاسیون و ته‌نشینی (۶) اشاره نمود. گزارش‌های زیادی از جذب پلیمری و جذب غشایی برای حذف جیوه نیز وجود دارد. هر کدام از این تکنیک‌ها معایب و مزایای خاص خود را دارند. کاربرد فرایند جذب سطحی مخصوصاً با استفاده از دورریزهای بخش کشاورزی

ورود فلزات سنگین ناشی از فاضلاب صنعتی به آب‌های طبیعی، یک نگرانی جدی در دهه‌های گذشته به‌وجود آورده است. در این میان جیوه یکی از فلزات سنگین سمی با ویژگی‌های خاص می‌باشد. جیوه از فلزاتی است که می‌تواند از خاک و آب تبخیر شود. همچنین میکروب‌ها فرم غیرآلی جیوه را به فرم آلی تبدیل می‌کنند که در بدن موجودات تجمع می‌یابد. ترکیبات جیوه به‌عنوان کاتالیزور، فارچ‌کش، آفت‌کش، گندزدا و پاک‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱). جیوه به‌وسیله فعالیت‌های مختلف انسانی از جمله اشتعال سوخت‌های

ناشی از محل جغرافیایی رشد گیاه می‌باشد یا ناشی از نحوه آماده‌سازی آن‌ها به‌منظور دستیابی به یک جاذب مناسب. لذا، برای پاسخ دادن به این سؤال، این تحقیق پایه‌گذاری شد تا کارایی دو نوع پوست بادام رشدیافته در نواحی مرکزی ایران در حذف کاتیون فلزی، بررسی و با یکدیگر مقایسه شود. با توجه به سمیت و اثرات نامطلوب زیست‌محیطی یون‌های فلزات سنگین و مخصوصاً جیوه و با توجه به مصرف این ماده در صنایع گوناگون از جمله صنعت پتروشیمی که در کشورمان از جایگاه خاصی برخوردار است و لذا افزایش پتانسیل ورود این ماده به محیط زیست، ابداع روش‌های ساده، ارزان و کارآمد به‌منظور حذف جیوه از محلول‌های آبی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش، ابتدا کارایی پوست بادام در جذب و در نتیجه حذف جیوه از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار گرفت. سپس به‌منظور شناسایی گروه‌های عاملی مؤثر بر جذب یون‌های جیوه و همچنین بررسی تأثیر نوع بادام در میزان کارایی پوست آن، دو نوع پوست بادام سخت و نازک، انتخاب و به‌عنوان جاذب طبیعی به‌منظور حذف Hg^{2+} از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار گرفت. ضمن بهینه‌سازی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر فرایند جذب توسط هر دو نوع پوست، ماکزیمم ظرفیت جذب جیوه نیز در سطح جاذب‌ها به‌دست آمده و کارایی آن‌ها در حذف جیوه از فاضلاب سنتزی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نوع تجربی - مداخله‌ای است. اثر عوامل مداخله‌گر در جذب جیوه توسط دو نوع پوست بادام به‌روش یک فاکتور در یک زمان بررسی شد. نمونه‌های پوست بادام مورد استفاده به‌عنوان جاذب، از چهار فروشگاه محلی در شهرستان تفت استان یزد به‌صورت تصادفی انتخاب و کاملاً با یکدیگر مخلوط شده و تحت عناوین پوست سخت و پوست نازک

به‌عنوان جاذب طبیعی در دو دهه اخیر، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مزایای اصلی این تکنیک، فراوان بودن و راندمان بالای جذب، هزینه بهره‌برداری پایین، سرعت زیاد فرایند و عدم تولید فاضلاب ثانویه می‌باشد. استفاده از تولیدات کشاورزی و سایر جاذب‌های طبیعی به‌طور گسترده به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های گران‌حذف فلزات سنگین از آب و فاضلاب مورد بررسی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه استفاده از مواد زاید پوست گردو (۷)، فیبرهای نخل خرما (۸)، توده خزه (۹)، پوست فندق (۱۰) و پوست سبزی بادام (۱۱) گزارش شده است که در حذف جیوه و دیگر فلزات سنگین از محلول‌های آبی توانا هستند. قودبان و همکارش از پوست اکالیپتوس به‌عنوان جاذب طبیعی در حذف جیوه از محلول‌های آبی استفاده نمودند. ضمن بررسی‌های سینتیکی فرایند جذب جیوه، مکانیسم جذب را نیز بررسی نموده و مدل جذبی لانگمویر شامل ماکزیمم ظرفیت جذب $33/11$ میلی‌گرم جیوه بر گرم جاذب را گزارش نمودند (۱۲). ساری و همکاران گزارشی در ارتباط با استفاده از خزه به‌عنوان جاذب طبیعی در حذف جیوه گزارش دادند. ماکزیمم میزان جذب در pH برابر ۵/۵، مدت زمان ۶۰ دقیقه، میزان جاذب ۴ گرم بر لیتر و در دمای $20^{\circ}C$ به‌دست آمد. ماکزیمم ظرفیت جذب حاصل از مدل لانگمویر، $94/4$ میلی‌گرم جیوه بر گرم جاذب گزارش شده است (۹).

پوست بادام به‌عنوان دورریز در صنایع غذایی محسوب شده که مهم‌ترین کاربرد آن به‌عنوان سوخت در تولید انرژی می‌باشد. پوست بادام حاوی سیلیکا، کربوهیدرات، سلولز و گروه‌های هیدروکسیل می‌باشد. بنابراین این ماده پتانسیل بالقوه‌ای برای جذب یون‌های فلزی از محلول‌های آبی دارد. در بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه استفاده از دورریزهای کشاورزی به‌عنوان جاذب طبیعی برای یک جاذب مشخص در حذف کاتیون معین، کارایی‌های بسیار متفاوتی گزارش شده است. حال این سؤال مطرح می‌شود آیا این تفاوت

توسط اسید نیتریک و یا محلول سود رقیق شد سپس ۰/۱۰ گرم از نمونه‌های پوست بادام به محلول کاتیون، اضافه و به مدت ۲۰ دقیقه بر شیکر قرار داده شد تا جذب کامل گردد. پس از این مدت زمان نمونه‌ها توسط کاغذ صافی صاف شدند و به منظور اندازه‌گیری میزان غلظت کاتیون باقی مانده از دستگاه ICP مدل ICP-OES Varian 710 ES استفاده شد. اثر سایر پارامترها به صورت کاملاً مشابه و با لحاظ نمودن کمیت بهینه به دست آمده در آزمایش قبلی ادامه یافت.

میزان یون فلزی جذب شده از تفاوت بین غلظت اولیه و غلظت بعد از تماس با جاذب محاسبه گردید. هر آزمایش ۵ مرتبه تکرار و میانگین اندازه‌گیری‌ها به عنوان نتیجه نهایی گزارش شد. با توجه به تعداد پارامترها، تعداد سطوح مورد بررسی و تکرارها در مجموع ۲۵۰ آزمایش به منظور بهینه‌سازی پارامترها و ۲۴ آزمایش در تعیین پارامترهای فیزیکی دو نوع جاذب انجام گرفت. از غلظت‌های تعادلی به دست آمده برای محاسبه ظرفیت تعادلی جذب فلز مطابق با رابطه زیر استفاده گردید (۱۳).

$$q_e = (C_0 - C_e) \times V / m \quad (1)$$

که در آن q_e (mg/g) میزان غلظت تعادلی فلز در فاز جاذب، C_0 و C_e غلظت‌های اولیه و تعادلی فلز بر حسب میلی‌گرم بر لیتر در فاز محلول، V حجم محلول بر حسب لیتر و m میزان جاذب بر حسب گرم می‌باشند.

دو مدل ایزوترم جذبی لانگمویر و فرنللیچ به منظور بررسی مکانیسم جذب استفاده شد.

مدل لانگمویر: معادله خطی لانگمویر به کار برده شده برای جذب تعادلی عبارتست از:

$$1/q_e = 1/q_m + 1/bq_m C_e \quad (2)$$

که در آن C_e غلظت تعادلی در محلول بر حسب میلی‌گرم بر لیتر، q_e میزان فلز جذب شده از محلول بر حسب میلی‌گرم بر گرم و q_m و b نیز ثابت‌های معادله لانگمویر می‌باشند که به ترتیب به ماکزیم ظرفیت جذب و انرژی جذب بستگی دارند.

نامگذاری گردیدند. سپس نمونه‌های پوست بادام، آسیاب شده و با عبور دادن از غربال‌های مش‌بندی، ذراتی با ابعاد ۲۶۰-۴۴ میکرومتر از آن‌ها جداسازی و جمع‌آوری گردید. نمونه‌های آسیاب شده با آب مقطر چندین بار شستشو شد و در دمای 100°C به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. از محلول استاندارد تیترازول $\text{Hg}^{2+} 1000 \text{ ppm}$ ساخت شرکت مرک آلمان به عنوان محلول مادر استفاده و محلول‌های دیگر از رقیق کردن متوالی آن تهیه گردید. در کلیه آزمایشات از آب دیون استفاده شد.

حذف جیوه توسط پوست بادام به روش ناپیوسته یا منقطع مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور تعیین pH نمونه‌های جاذب، مخلوط ۵ گرم بر لیتر از هر نمونه در آب مقطر تهیه و به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی نگه‌داشته شد. سپس pH محلول با استفاده از pH متر قرائت شد. در اندازه‌گیری دانسیته جاذب‌ها، از روش معمول افزایش حجم آب مقطر طی افزودن ۵ گرم جاذب به ۱۰۰ میلی لیتر آب استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری میزان مواد محلول در آب، ۳ گرم از هر نمونه جاذب با ۱۰۰ میلی لیتر از آب مقطر مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت روی شیکر به هم زده شد. سپس نمونه‌ها صاف و در دمای 120°C به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. از اختلاف وزن به دست آمده، درصد مواد محلول در آب محاسبه گردید. درصد رطوبت جاذب‌ها با حرارت دادن ۵ گرم نمونه در دمای 120°C به مدت ۲۴ ساعت و اندازه‌گیری اختلاف وزن به دست آمده محاسبه گردید.

در بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فرایند جذب از روش یک فاکتور در یک زمان استفاده گردید و طی آن اثر pH (در محدوده ۷-۲ در شش سطح)، زمان تماس (در مدت زمان ۴۰-۵ دقیقه در هفت سطح)، میزان جاذب (در محدوده ۹-۱ گرم بر لیتر در هفت سطح) و غلظت اولیه کاتیون (در محدوده ۵۰۰-۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در پنج سطح) بررسی گردیدند. به عنوان مثال برای بهینه‌سازی pH ابتدا ۳۰ میلی لیتر از محلول حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر از کاتیون جیوه قبل از افزودن جاذب

آمد. غلظت نهایی یون‌های فوق در حد 0.1 mM بود، شرایط برای تصفیه محلول فوق مطابق با پارامترهای اپتیمم شده تنظیم شده و درصد حذف جیوه از محلول فوق توسط دو نمونه جاذب بررسی گردید.

یافته‌ها

در ابتدا ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هر دو نمونه پوست بادام مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۱). به منظور بررسی گروه‌های عاملی موجود در سطح پوست بادام از آزمایشات بوهم استفاده گردید (۱۴). مساحت سطحی پوست بادام به روش جذب هیدروژن تک نقطه‌ای با استفاده از میکرومتریک فلوزرب 2305 به دست آمد. اثر pH بر میزان جذب جیوه توسط نمونه‌های جاذب بررسی شد (نمودار ۱ الف). همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود درصد حذف Hg^{2+} تحت تأثیر pH محلول می‌باشد. با افزایش pH از $5-2$ میزان جذب جیوه در سطح هر دو جاذب افزایش می‌یابد و در مقادیر بالاتر از pH حذف Hg^{2+} کاهش می‌یابد. بنابراین pH $5/5$ به عنوان مقدار بهینه برای ادامه بررسی‌ها انتخاب گردید. بعد از بهینه نمودن pH مدت زمان تماس جاذب و محلول کاتیون بهینه‌سازی گردید. با ثابت نگه داشتن PH در مقدار $5/5$ و میزان $0.1/10$ گرم از هر نمونه جاذب،

مدل فرندلیچ: فرندلیچ نشان داد که فرایند جذب توسط معادله زیر صورت می‌گیرد:

$$q_e = k_f \cdot C_e^{1/n} \quad (3)$$

که در آن C_e غلظت تعادلی فلز در محلول بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و q_e میزان فلز جذب شده به ازای وزن جاذب بر حسب میلی‌گرم بر گرم و n و K_f ثابت‌های جذب فرندلیچ می‌باشند که به ترتیب به شدت جذب و ظرفیت جذب بستگی دارند. فرم لگاریتمی معادله فرندلیچ به صورت زیر است:

$$\text{Log } q_e = \log k_f + 1/n \log C_e \quad (4)$$

ایزوترم جذب فرندلیچ با رسم لگاریتمی q_e بر حسب لگاریتم C_e یک خط راست با شیب $1/n$ و عرض از مبدأ $\text{Log } K_f$ می‌باشد (۱۳).

بعد از محاسبه ماکزیمم ظرفیت جذب و تعیین گروه‌های عاملی برای هر کدام از نمونه‌های جاذب، با استفاده از تست آماری F و t در سطح اطمینان 95% دو نمونه جاذب با یکدیگر مقایسه گردیدند.

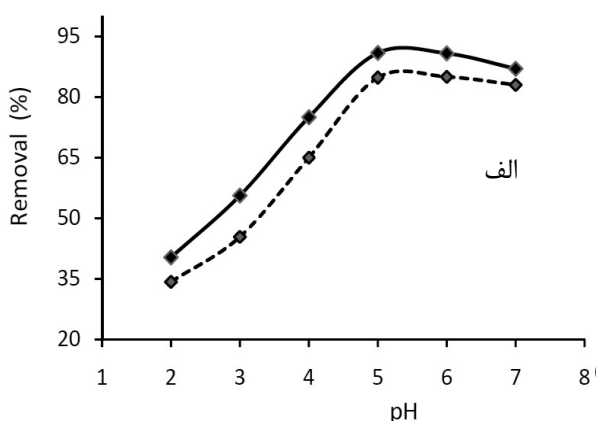
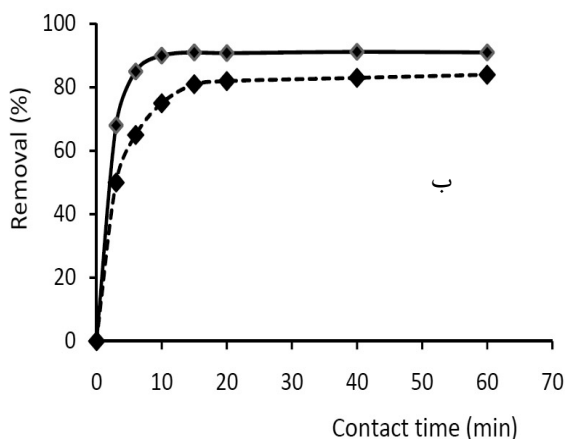
به منظور بررسی کارایی پوست بادام در تصفیه فاضلاب حاوی یون‌های جیوه و تأثیر حضور سایر کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر کارایی روش یک محلول آبی با افزودن Hg^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} و Al^{3+} به آب چاه شمال تهران به دست

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی دو نمونه پوست بادام

P value	پوست نازک	پوست سخت	پارامتر
<0.0001	0.43 ± 0.1	0.05 ± 1.06	دانشسته ذرات (g.cm^{-3})
0.2171	5.12 ± 0.21	5.30 ± 0.22	pH (محلول ۵ گرم بر لیتر)
0.0297	4.46 ± 0.20	4.86 ± 0.28	میزان مواد محلول در آب (%)
<0.0001	3.20 ± 0.18	5.15 ± 0.23	میزان رطوبت (%)
	$15/65$	$21/11$	مساحت سطحی (m^2/g)
<0.0001	0.82 ± 0.04	1.20 ± 0.06	گروه‌های کربوکسیلیک (mmol/g)
0.0239	0.93 ± 0.04	0.86 ± 0.04	گروه‌های فنولیک (mmol/g)
<0.0001	0.58 ± 0.03	1.11 ± 0.05	گروه‌های لاکتونیک (mmol/g)

اندازه ذرات
(میکرون)

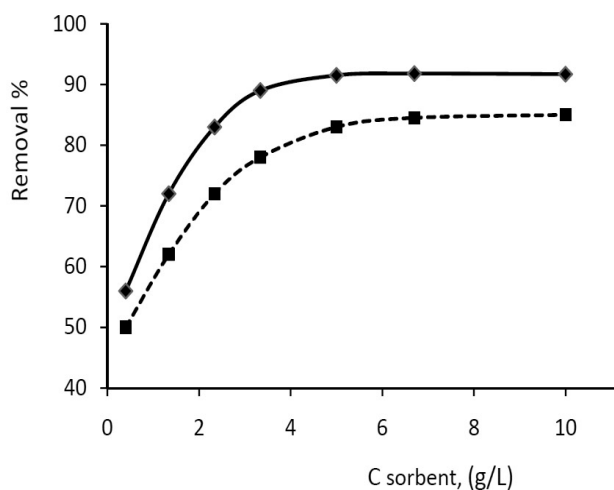
نتایج آزمایشات بوهم



نمودار ۱- الف) تاثیر PH بر راندمان حذف ، ب) اثر زمان تماس بر میزان حذف جیوه در سطح پوست سخت (-) و پوست نازک (---) بادام

به منظور بررسی اثر مقدار جاذب در حذف یون جیوه، مقادیر مختلف جاذب در محدوده ۰/۳-۰/۱۲ گرم در تماس با محلول یون جیوه با غلظت اولیه ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر از Hg^{+2} قرار داده شد (نمودار ۲). همان طور که مشاهده می شود با افزایش میزان جاذب و لذا افزایش سطح تماس کاتیون و جاذب، میزان جذب نیز افزایش می یابد. لیکن در مقادیر بالاتر از ۵ گرم بر لیتر از پوست سخت و بالاتر از ۴ گرم بر لیتر از پوست نازک میزان جذب، مستقل از میزان جاذب می شود. لذا میزان ۵ و ۶ گرم بر لیتر به ترتیب از پوست سخت و پوست نازک به عنوان مقدار بهینه برای ادامه بررسی ها مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور بررسی مکانیسم فرایند جذب، ایزوترم های جذبی جیوه در سطح پوست های بادام مورد بررسی قرار گرفت. غلظت ابتدایی Hg^{+2} در رنج ۵۰۰-۱۰ میلی گرم در لیتر تغییر داده شد. اطلاعات جذب Hg^{+2} به وسیله مدل ایزوترم جذبی لانگمویر و فروندلیچ آنالیز شد (جدول ۲). همان گونه که مشاهده می شود نتایج تجربی، تطابق بهتری با مدل لانگمویر داشته و مقدار ماکزیم ظرفیت جذب جیوه در سطح پوست بادام تحت شرایط بهینه به دست آمده به ترتیب برابر با $135/13 \pm 8/34$ و



نمودار ۲- اثر غلظت جاذب بر راندمان جذب جیوه در سطح پوست سخت (-) و پوست نازک (---) بادام.

غلظت ابتدایی کاتیون جیوه ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، اثر زمان تماس در جذب Hg^{+2} در محدوده ۴۰-۵ دقیقه بررسی شد. میزان حذف یون جیوه با افزایش زمان تماس، افزایش می یابد. به گونه ای که اکثر یون های فلزی در مدت زمان ۱۵ دقیقه جذب شده و بعد از آن فرایند جذب به تعادل می رسد. البته سرعت رسیدن به تعادل در پوست نازک، کمی طولانی تر از پوست سخت است (نمودار ۱ ب).

جدول ۲- نتایج ثابت‌های معادلات لانگمویر و فروندلیچ

ثابت‌های لانگمویر			ثابت‌های فروندلیچ			جاذب
Q_m (mg/g)	b (L/mg)	r^2	K_F (mg/g)	n	r^2	
$135/13 \pm 8/34$	$0/0074$	$0/9944$	$0/09 \pm 1/13$	$0/86$	$0/9070$	پوست سخت
$105/30 \pm 7/92$	$0/017$	$0/9962$	$1/08 \pm 0/08$	$0/93$	$0/9210$	پوست نازک

تعیین شده توسط EPA ($0/15$ mg/l) در نظر گرفته شد. بررسی‌های اولیه به دلیل حضور سایر گونه‌های یونی در محلول و لذا رقابت برای دسترسی به جایگاه‌های فعال سطحی چندان رضایت‌بخش نبود. بنابراین میزان جاذب در این مرحله مجدد مورد بررسی قرار گرفته و بهینه‌سازی شد. غلظت $Hg+2$ پس از تصفیه توسط میزان مختلف جاذب در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود به‌منظور تصفیه 100 میلی‌لیتر، از محلول فوق 2 گرم از پوست بادام سخت و 3 گرم از پوست بادام نازک مورد نیاز است تا غلظت $Hg+2$ پس از تصفیه کم‌تر از مقدار تعیین شده توسط EPA برای تصفیه فاضلاب به‌دست آید.

جدول ۳- غلظت یون جیوه باقیمانده در محلول آبی حاوی 100 میلی

گرم بر لیتر جیوه بعد از تصفیه با مقادیر مختلف از پوست بادام

میزان جاذب (گرم/لیتر)	غلظت یون جیوه باقیمانده (میلی‌گرم بر لیتر)	
	پوست نرم	پوست سخت
۵	$7/30$	$17/15$
۱۰	$4/03$	$8/50$
۱۵	$1/85$	$3/63$
۲۰	$0/14$	$1/05$
۳۰	$0/10$	$0/13$

بحث

در مشاهدات ظاهری دو نمونه پوست بادام میزان تخلخل پوست سخت بادام بیشتر به‌نظر می‌رسد، لذا در اولین گام، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دو نمونه

$105/30 \pm 7/92$ میلی‌گرم جیوه به ازای هر گرم جاذب برای پوست سخت و نازک می‌باشد که از لحاظ آماری ($P=0/0005$) این اختلاف معنادار است.

به‌منظور اثبات تفاوت در گروه‌های عاملی سطحی مؤثر در فرایند جذب و همچنین کارایی دو نمونه پوست بادام، آزمون آماری بر نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی انجام گرفت. براساس نتایج آزمون F دقت آزمون‌ها یکسان ارزیابی شد و لذا بعد از محاسبه انحراف استاندارد ادغام، تست t و مقدار P به منظور تعیین معنادار بودن یا نبودن اختلاف مابین نتایج، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد تفاوت بین گروه‌های فعال سطحی (گروه‌های کربوکسیلیک: $P < 0/0001$ ، گروه‌های فنولیک: $P = 0/0239$ ، گروه‌های لاکتونیک: $P < 0/0001$) و ماکزیم ظرفیت جذب ($p = 0/0005$) از لحاظ آماری معنادار بوده و می‌توان گفت کارایی پوست بادام سخت در حذف کاتیون جیوه از نمونه‌های آب، بیشتر از پوست بادام نازک است.

به‌منظور بررسی کارایی پوست بادام در تصفیه فاضلاب حاوی یون‌های جیوه و تأثیر حضور سایر کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر کارایی روش، یک محلول آبی با افزودن $Hg+2$ ، $Cd+2$ ، $Ni+2$ ، $Co+2$ ، $Zn+2$ ، $Cu+2$ ، $Fe+3$ ، $Al+3$ ، $Bi+3$ به آب چاه شمال تهران به‌دست آمد. شرایط برای تصفیه محلول فوق مطابق با پارامتر اپتیمیم شده که در بالا توضیح داده شد یعنی $pH = 5/5 \pm 0/1$ ، زمان تماس 15 دقیقه و در دمای اتاق و همچنین میزان جاذب 5 گرم بر لیتر برای پوست سخت و 6 گرم بر لیتر از پوست نازک تنظیم شد. ملاک تصفیه، باقیماندن جیوه در محلول آبی تصفیه‌شده کم‌تر از مقدار

برای حذف جیوه بر سطح برگ درخت بید با ماکزیمم ظرفیت جذب ۳۷/۲ میلی گرم بر گرم گزارش نموده‌اند (۱۸). زو و همکارانش از زغال فعال اصلاح شده با سیلیکون‌های آمین دار به منظور حذف جیوه استفاده کرده و زمان ۳۰۰ دقیقه برای رسیدن به تعادل را گزارش نموده‌اند که زمان بسیار طولانی می‌باشد (۱۹).

در مطالعه اثر میزان جاذب نیز مشاهده گردید در ابتدا با افزایش جاذب، راندمان جذب نیز افزایش می‌یابد، لذا در مقادیر ۵ و ۶ گرم بر لیتر از پوست بادام سخت و نرم، راندمان جذب مستقل از میزان جاذب می‌شود که احتمالاً به دلیل اشباع شدن سطح جاذب و لذا نیاز به نفوذ کاتیون در لایه‌های درونی پوست بادام، افزایش میزان جاذب تأثیر چندانی در راندمان جذب ندارد (۲۰). رفتار مشابهی برای دیگر جاذب‌ها گزارش شده است (۷، ۹، ۱۸ و ۲۱).

بررسی مکانیسم فرایند جذب با استفاده از دو مدل جذبی لانگمویر و فرنلیدج نشان داد نتایج تجربی تطابق بهتری با مدل لانگمویر دارد. این رفتاری است که در اکثر جاذب‌های طبیعی مشاهده می‌شود (۱۵ و ۲۰). ماکزیمم ظرفیت جذب جیوه در سطح دو نمونه جاذب پوست سخت و پوست نرم به ترتیب برابر با ۱۳۵/۱۳ و ۱۰۵/۳۰ میلی گرم جیوه بر گرم جاذب از نمودار لانگمویر به دست آمد. این مقادیر در مقایسه با دیگر جاذب‌های طبیعی و سنتزی گزارش شده نشان‌دهنده کارایی بهتر پوست بادام می‌باشد. بایرام‌غلو و همکارش از دانه‌های پلیمری مغناطیسی در حذف جیوه از محیط‌های آبی استفاده نمودند و ماکزیمم ظرفیت جذب جیوه برابر ۱۲۴/۸ میلی گرم جیوه بر گرم جاذب و زمان تعادل یک ساعت را گزارش دادند. هرچند مقدار ماکزیمم ظرفیت جذب این جاذب قابل مقایسه با مقدار گزارش شده برای کار حاضر می‌باشد لذا فرایند تهیه جاذب، هزینه‌بر، وقت‌گیر و نسبتاً دشوار است (۲۲). کریشنانی و همکارانش ماکزیمم ظرفیت جذب جیوه برابر با ۳۳/۱ میلی گرم جیوه بر گرم جاذب را برای جذب جیوه بر سطح پوسته برنج گزارش نمودند (۲۳).

جاذب بررسی شد. نتایج نشان داد دانسیته و مساحت سطحی پوست سخت از پوست نازک بیشتر می‌باشد. نتایج آزمایش بوهم نیز نشان می‌دهد گروه‌های عاملی سطحی دو نمونه متفاوت است. با بررسی‌های آماری اثبات گردید که اختلاف به دست آمده مابین گروه‌های عاملی و همچنین ماکزیمم ظرفیت جذب دو نمونه جاذب دارای اختلاف معناداریست. لذا نوع گونه بادام بر میزان گروه‌های فعال سطحی تأثیرگذار بوده و در نهایت باعث ایجاد ویژگی‌های مختلف سطح و کارایی‌های مختلف می‌گردد.

اثر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر فرایند جذب در سطح هر دو جاذب بررسی شد. نتایج بررسی اثر pH نشان داد مقدار ۵/۵ میزان بهینه برای حذف جیوه از نمونه‌های آبی در سطح جاذب‌ها می‌باشد. مکانیسم‌های گوناگونی در فرایند حذف کاتیون‌های فلزی توسط جاذب‌های طبیعی گزارش شده است. فرایندهایی مانند جاذبه الکترواستاتیک، تبادل یون و برهمکنش‌های شیمیایی. با افزایش pH دانسیته بار الکتریکی منفی در سطح به علت دپروتونه شدن گروه‌های عاملی سطح افزایش یافته و لذا جاذبه الکترواستاتیکی بین یون‌های فلزی با بار مثبت و بار منفی سطح افزایش یافته و جذب سطحی نیز افزایش می‌یابد. در pH ۵ جاذبه الکترواستاتیک ماکزیمم مقدار خود را دارد و در مقادیر بالاتر از pH به علت تشکیل رسوب $Hg(OH)_2$ ، میزان جذب، اندکی کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی توسط شین و همکارانش در حذف فلزات سنگین توسط زغال فعال گزارش شده است (۱۵).

در بررسی اثر زمان تماس بر راندمان حذف جیوه مشاهده گردید در ۱۵ دقیقه اول تماس ماکزیمم، میزان جذب انجام می‌گیرد و بعد از آن با طولانی‌تر شدن زمان تماس تأثیری در راندمان حذف مشاهده نمی‌شود. این زمان در مقایسه با زمان‌های گزارش شده در سایر مقالات (۱۶-۱۸) کم‌تر بوده و باعث افزایش سرعت تصفیه می‌گردد. الرمالی و همکارانش مدت زمان یک ساعت را

گروه‌های کریوکسیلیک و لاکتونیک در پوست سخت بیشتر از پوست نرم است و از آنجا که برهمکنش مابین این گروه‌ها و کاتیون در جذب یون‌های جیوه مؤثر می‌باشند می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که نقش این دو گروه عاملی در حذف جیوه بیشتر از گروه‌های فنلی می‌باشد و به‌منظور افزایش کارایی سایر جاذب‌ها نیز می‌توان از اصلاح‌گرهای حاوی این دو گروه عاملی استفاده نمود. مکانیسم فرایند جذب، از معادله لانگمویر تبعیت می‌کند. هرچند نتایج حاصل از بررسی‌های آماری نشان‌دهنده کارایی بیشتر پوست سخت بادام است لذا مقایسه ماکزیمم ظرفیت جذب پوست بادام با دیگر جاذب‌های طبیعی نشان‌دهنده کارایی بالای این جاذب در تصفیه فاضلاب‌های حاوی جیوه می‌باشد. پوست بادام می‌تواند به‌عنوان یک جاذب طبیعی ارزان‌قیمت، در دسترس و دوست‌دار طبیعت در تصفیه فاضلاب آلوده به جیوه معرفی گردد.

تشکر و قدردانی

نویسنده این مقاله از دانشکده سلامت، ایمنی و محیط زیست دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی تشکر و قدردانی می‌نماید.

بررسی‌ها نشان داد ماکزیمم ظرفیت جذب به‌دست‌آمده با استفاده از مدل جذبی لانگمویر برای پوست سخت بادام در مقایسه با پوست نرم بادام بیشتر می‌باشد و لذا کارایی این نوع پوست بادام در حذف جیوه بیشتر می‌باشد. تأیید این ادعا در راندمان حذف جیوه از محلول آبی با بافت نسبتاً پیچیده که حاوی سایر آنیون‌ها و کاتیون‌ها می‌باشد نیز مشاهده می‌گردد. مقادیر کم‌تری از پوست سخت بادام به‌عنوان جاذب برای حذف جیوه مورد نیاز است. البته ماکزیمم ظرفیت جذب به‌دست‌آمده برای این دو جاذب، زمان لازم برای رسیدن به تعادل و میزان جاذب مورد نیاز که در این پژوهش حاصل شده در مقایسه با این پارامترها برای حذف جیوه توسط دیگر جاذب‌ها (۱۶، ۱۹ و ۲۳)، نشان‌دهنده کارایی خوب هر دو نمونه جاذب در حذف یون‌های جیوه از محلول‌های آبی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد پوست بادام کارایی بالایی در حذف Hg^{+2} از محلول‌های آبی دارد. بررسی ویژگی‌های فیزیکی و گروه‌های عاملی سطحی نشان داد هرچند نوع گروه‌های عاملی در هر دو جاذب یکسان است ولی میزان

References:

- Morita M, Yoshinaga J, Edmonds JS. The determination of mercury species in environment and biological samples. *Pure & Applied Chemistry*. 1998;70(8):1585-615.
- He Z, Siripornadulsil S, Sayre RT, Traina SJ, Weavers LK. Removal of mercury from sediment by ultrasound combined with biomass (transgenic *Chlamydomonas reinhardtii*). *Chemosphere*. 2011;83(9):1249-54.
- Byun Y, Koh DJ, Shin DN. Removal mechanism of elemental mercury by using non-thermal plasma. *Chemosphere*. 2011;83(1):69-75.
- Wan Q, Duan L, He K, Li J. Removal of gaseous elemental mercury over a CeO_2-WO_3/TiO_2 nanocomposite in simulated coal-fired flue gas. *Chem Eng J*. 2011;170(2-3):512-7.
- Verma V, Tewari S, Rai J. Ion exchange during heavy metal bio-sorption from aqueous solution by dried biomass of macrophytes. *Biores Technol*. 2008;99(6):1932-8.
- ElSamrani A, Lartiges B, Villiéras F. Chemical coagulation of combined sewer overflow: Heavy metal removal and treatment optimization. *Water research*. 2008;42(4-5):951-60.
- Zabihi M, Ahmadpour A, Asl A. Removal of mercury from water by carbonaceous sorbents derived from walnut shell. *J Hazard Mater*. 2009;167(1-3):230-6.
- Ofomaja A. Equilibrium studies of copper ion adsorption onto palm kernel fibre. *J Environ Manag*. 2010;91(7):1491-9.
- Sari A, Tuzen M. Removal of mercury(II) from aqueous solution using moss (*Drepanocladus revolvens*) biomass: Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies. *J Hazard Mater*. 2009;171:500-07.
- Yao ZY, Qi JH, Wang LH. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on the biosorption of Cu(II) onto chestnut shell. *J Hazard Mater*. 2010;174:137-43.

11. Ahmadpour A, Tahmasbi M, Bastami T, Besharati J. Rapid removal of cobalt ion from aqueous solutions by almond green hull. *J Hazard Mater.* 2009;166(2-3):925-30.
12. Ghodbane I, Hamdaoui O. Removal of mercury(II) from aqueous media using eucalyptus bark: kinetic and equilibrium studies. *J Hazard Mater.* 2008;160:301-09.
13. Ho YS, Porter JF, McKay G. Equilibrium isotherm studies for the sorption of divalent metal ions onto peat: copper, nickel and lead single component systems. *Water, Air, and Soil Pollution.* 2002;141:1-33.
14. Boehm H. Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment. *Carbon.* 2002;40(2):145-9.
15. Shin CH, Bae JS. Performance of an activated carbon adsorber in a water reclamation system with an electrolysis reactor. *J Indust Eng Chem.* 2009;15(2):179-84.
16. Tuzen M, Sari A, Mendil D, Soylak M. Biosorptive removal of mercury(II) from aqueous solution using lichen (*Xanthoparmelia conspersa*) biomass: Kinetic and equilibrium studies. *J Hazard Mater.* 2009;169:263-70.
17. Rao MM, Reddy DHKK, Venkateswarlu P, Sessaiah K. Removal of mercury from aqueous solutions using activated carbon prepared from agricultural by-product/waste. *J Environ Manag.* 2009;90(1):634-43.
18. Al Rmalli SW, Dahmani AA, Abuein MM, Gleza AA. Biosorption of mercury from aqueous solutions by powdered leaves of castor tree (*Ricinus communis* L.). *J Hazard Mater.* 2008;152:955-9.
19. Zhu J, Yang J, Deng B. Enhanced mercury ion adsorption by amine-modified activated carbon. *J Hazard Mater.* 2009;166:866-72.
20. Pehlivan E, Altun T, Cetin S, Bhangar MI. Lead sorption by waste biomass of hazelnut and almond shell. *J Hazard Mater.* 2009;167:1203-08.
21. Krishnani KK, Meng X, Christodoulatos C, Boddur VM. Biosorption mechanism of nine different heavy metals onto biomatrix from rice husk. *J Hazard Mater.* 2008;153:1222-34.
22. Bayramoğlu G, Arica MY. Kinetics of mercury ions removal from synthetic aqueous solutions using by novel magnetic p(GMA-MMA-EGDMA) beads. *J Hazard Mater.* 2007;144:449-57.
23. Krishnani K, Meng X, Christodoulatos C, Boddu V. Biosorption mechanism of nine different heavy metals onto biomatrix from rice husk. *J Hazard Mater.* 2008;153(3):1222-34