

# حذف کادمیم از محیط آبی در غلظتهای کم به وسیله پوسته شلتوک اصلاح شده

زمان شامحمدی حیدری<sup>۱</sup> هادی معاضد<sup>۲</sup> نعمت... جعفرزاده حقیقی<sup>۳</sup> پرویز حقیقت جو<sup>۴</sup>

(دریافت ۸۶/۸۷ پذیرش ۸۷/۳/۵)

## چکیده

در این تحقیق تأثیر مولاریته‌های مختلف سدیم بی‌کربنات بر افزایش ظرفیت پوسته شلتوک در جذب کادمیم در غلظتهای کم، مورد بررسی قرار گرفت. حداکثر راندمان جذب در pH برابر ۶ اتفاق افتاد و زمان تعادل جذب ۱/۵ ساعت به دست آمد. نتایج آزمایش‌های شیمیایی همراه با عکسبرداری از انواع مختلف جاذب اصلاح شده، توسط میکروسکوپ الکترونی نشان داد که رابطه مناسبی بین تعداد و میانگین قطر خلل و فرج جاذب با راندمان جذب وجود دارد. همچنین، حداکثر راندمان جذب کادمیم توسط پوسته شلتوک ۹۹/۱ درصد به دست آمد که مربوط به استفاده از جاذب اصلاح شده توسط محلول ۰/۳ مولار سدیم بی‌کربنات می‌باشد. در این تحقیق، مدل‌های جذب سینتیک نیز مورد مطالعه قرار گرفت. اگر چه هر دو مدل لاگرگرن (۱۸۹۸) و هو و همکاران (۱۹۹۶) در سطح اعتماد ۹۵ درصد، داده‌ها را توصیف کردند، ولی مدل لاگرگرن (۱۸۹۸) در مقایسه با مدل هو و همکاران (۱۹۹۶) داده‌ها را بهتر توصیف کرد. مقایسه ضرایب به دست آمده با ضرایب سایر مدل‌ها در مطالعات دیگر، نشان داد که سرعت جذب سطحی کادمیم بر روی پوسته شلتوک اصلاح شده با سدیم بی‌کربنات ۰/۳ مولار، بسیار سریع می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پوسته شلتوک، کادمیم، جذب، محلول سدیم بی‌کربنات، تخلخل.

## Removal of Low Concentrations of Cadmium from Water Using Improved Rice Husk

Zaman Shamohammadi<sup>1</sup> Hadi Moazed<sup>2</sup> Nematollah Jaafarzadeh<sup>3</sup> Parviz Haghghat Jou<sup>4</sup>

(Received Oct. 29, 2007 Accepted May 25, 2008)

### Abstract

This paper studies the effect of different molarities of sodium bicarbonate on enhanced absorption capacity of rice husk to remove cadmium in low concentrations. Maximum absorption efficiency was achieved at a pH of 6 and absorption equilibrium time was 1.5 hours. Results of chemical experiments and photography by electronic microscope from improved rice husk revealed a good relationship to exist between number and average diameter of absorber pores, on the one hand, and absorption efficiency, on the other. Meanwhile maximum absorption efficiency of rice husk in cadmium removal was 99.1 percent which shows improvement due to 0.3 molar sodium bicarbonate. In this study, kinetic absorption models were also studied. Both Lagergrn (1898) and Ho et al. (1996) models satisfactorily described data with a confidence level of 95 percent; however, the latter model was found superior in this respect. Comparison of the coefficients calculated here with those reported in other models showed a faster cadmium absorption rate by improved rice husk due to 0.3 molar sodium bicarbonate.

**Keywords:** Rice Husk, Cadmium, Absorption, Sodium Bicarbonate Solution, Porosity.

1. Assis. Prof., Department of Agricultural Engineering-Water University of Zabol
2. Assis. Prof., Faculty of Water Sciences & Engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz
3. Assoc. Prof., Faculty of Health, Jundishapoor University of Ahwaz
4. Academic Staff, Department of Agricultural Engineering-Water University of Zabol

- ۱- استادیار گروه آب دانشگاه زابل
- ۲- استادیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
- ۳- دانشیار دانشکده بهداشت، دانشگاه جندی شاپور اهواز
- ۴- عضو هیئت علمی گروه آب دانشگاه زابل

است. از جمله آبهای نامتعارف، زهابهای کشاورزی می‌باشند که کماکان مورد استفاده کشاورزان قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه حداکثر غلظت مجاز کادمیم در آب آبیاری ۵۰ ppb می‌باشد، در مطالعه حاضر، غلظت ورودی محلولهای کادمیم برای آزمایش‌های جذب، ۱۰۰ ppb در نظر گرفته شده است.

## ۲- مواد و روشها

ابتدا پوسته شلتوک خام از کارخانه‌های محلی در اطراف شهر اهواز تهیه شد و با استفاده از الکهای شماره ۳۰ و ۴۰، اندازه‌های بین ۴۲۵ تا ۶۰۰ میکرون (متوسط هندسی قطر ذرات، ۵۱۰ میکرون) برای آزمایش انتخاب گردید. ذرات شلتوک با آب فراوان و سپس با استفاده از مواد پاک کننده چربی به خوبی شسته شد و در کوره تحت حرارت ۹۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۳ ساعت خشک گردید.

### ۲-۱- اصلاح یا فعال‌سازی شیمیایی جاذب

نمونه‌های تهیه شده جاذب با مواد پاک کننده و آب فراوان شسته شد و با آب مقطر، تمیز گردید. سپس نمونه‌ها در کوره، در حرارت ۸۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۳ ساعت خشک گردید و بلافاصله آزمایش‌های لازم بر روی آنها به عمل آمد.

برای تهیه انواع جاذبها (تیمارها)، ابتدا حجم معینی از محلولهای ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۱ مولار بی‌کربنات سدیم ( $\text{NaHCO}_3$ ) فراهم گردید. سپس مقدار ۱۰۰ گرم پوسته شلتوک خشک شده با ۲ لیتر محلول بی‌کربنات سدیم ۰/۱ مولار به مدت ۴ ساعت مخلوط و از قیف بوختر عبور داده شد. برای حذف مازاد کربنات سدیم از پوسته شلتوک اصلاح شده، پوسته شلتوک چندین بار با آب مقطر بدون یون، شست‌وشو گردید. جاذب به دست آمده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت خشک گردید و در دمای اتاق در یک بطری در بسته نگهداری شد. این کار برای مولارته‌های ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ نیز تکرار شد، به طوری که ۴ نوع جاذب مورد نظر، هر کدام به مقدار ۱۰۰ گرم تهیه گردید. جاذبهای تهیه شده به ترتیب NCRH1، NCRH3، NCRH5 و NCRH7 نام‌گذاری شد. در مرحله بعد، بخشی از نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های جذب نگهداری و بخشی دیگر، تحت عکس‌برداری توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) قرار گرفت. پس از انجام آزمایش بر روی چهار تیمار NCRH1، NCRH3، NCRH5 و NCRH7، با شمارش تعداد خلل و فرج و نیز اندازه‌گیری قطر مؤثر تخلخل ایجاد شده در سطوح مورد بررسی هر یک از تیمارها،

مطالعات مربوط به جذب فلزات سنگین با استفاده از بقایای گیاهی عمدتاً از دهه ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ شروع شد. در این مورد می‌توان به طور مشخص به مطالعات لارسن و شروپ که در آن از کربن فعال کاه برای حذف کادمیم استفاده گردید، اشاره کرد [۱]. مطالعات جذب در این دوره عمدتاً در مورد استفاده از بقایای گیاهی خام و ذغال آن صورت می‌گرفت.

از اواخر دهه ۹۰ میلادی بود که مطالعات جذب با استفاده از بقایای گیاهی شاهد تحول دیگری شد، به طوری که به جای استفاده از روش فعال‌سازی فیزیکی (ذغال فعال)، از فعال‌سازی شیمیایی یا اصلاح شیمیایی آن استفاده گردید. در این روش، ضمن افزایش ظرفیت جذب و کاهش زمان تعادل، هزینه‌های فعال‌سازی به مراتب کمتر از روش فعال‌سازی فیزیکی است. در این خصوص می‌توان به طور مشخص به مطالعات آجمال و همکاران اشاره کرد که بر اساس آن، راندمان جذب توسط پوسته شلتوک اصلاح شده به وسیله محلول ۱ مولار فسفات، بسیار بیشتر از پوسته شلتوک خام گزارش شده است [۲].

تارلی و همکاران استفاده از پوسته شلتوک اصلاح شده را به عنوان یک جاذب طبیعی فلزات سنگین برای فلز کادمیم و سرب، مورد مطالعه قرار دادند [۳]. نتایج به دست آمده توسط آنها نشان داد که پوسته شلتوک اصلاح شده با محلول ۰/۷۵ مولار سود سوزآور نسبت به پوسته شلتوک خام از ظرفیت جذب بیشتری برای هر دو فلز برخوردار است. همچنین، مطالعات ایزوترم نشان داد که مدل لانگمویر از مطابقت بیشتری نسبت به مدل فروندلیخ برخوردار می‌باشد.

تحقیقات کومار و باندی پادهیای بر روی جذب کادمیم از محلول آبی با استفاده از پوسته شلتوک اصلاح شده به وسیله سدیم بی‌کربنات با غلظت ۰/۵ مولار، نشان داد که اصلاحات ساده و کم هزینه شیمیایی می‌تواند به افزایش ظرفیت جذب از ۸/۵۸ میلی‌گرم بر گرم توسط پوسته شلتوک خام (RRH) به ۱۱/۱۲، ۲۰/۲۴، ۱۶/۱۸ و کاهش زمان تعادل از ۱۰ ساعت برای پوسته شلتوک خام، به ۴، ۲ و ۱ ساعت به ترتیب برای اپی کلروهیدرین شلتوک اصلاح شده (ERH)، شلتوک اصلاح شده به وسیله سود سوزآور (NRH) و شلتوک اصلاح شده با محلول سدیم بی‌کربنات (NCRH) منجر شود [۴]. در این گزارش با توجه به اینکه هزینه‌های تهیه سدیم بی‌کربنات کمتر از ۳۰ درصد هزینه‌های تهیه اپی کلروهیدرین می‌باشد، این ماده به عنوان محلول اصلاحی ارجح پیشنهاد شده است.

این تحقیق با هدف کاهش غلظت کادمیم از آبهای نامتعارف مورد استفاده در آب آبیاری مزارع منطقه خوزستان انجام شده

مشخصات آماری آنها تعیین گردید. همچنین، با استفاده از دستگاه SEM<sup>۱</sup>، تجزیه کیفی تیمارهای جاذب انجام گرفت.

## ۲-۲- تعیین pH بهینه جذب کادمیم

برای تعیین pH بهینه جذب کادمیم، تعداد شش ارلن انتخاب شد و به مدت ۲۴ ساعت در محلول اسید نگهداری گردید. سپس با آب شهر و آب بدون یون کاملاً شسته شد و ۱۰۰ میلی لیتر محلول فلز کادمیم (با غلظت ۱۰۰ ppb) از محلول ذخیره برداشت گردید و در هر یک از ارلن ها ریخته شد. بعد در هر کدام از ارلن ها، مقدار ۱ گرم جاذب NCRH1 ریخته شد و pH آنها به ترتیب در ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ تنظیم گردید. ارلن های حاوی محلول به مدت ۱۲ ساعت با سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه روی همزن قرار داده شد و پس از آن مجدداً pH آنها اندازه گیری و تغییرات یادداشت گردید. با استفاده از قیف شیشه ای و کاغذ صافی واتمن، نمونه ها را در قوطی های پلاستیکی که قبلاً کاملاً شسته شده بود ریخته، با افزودن مقدار معینی اسید نیتریک، pH آنها به زیر ۲ رسید و بلافاصله برای اندازه گیری مقدار کادمیم باقی مانده در محلول، آزمایش های جذب انجام گرفت. این کار، برای سه نوع جاذب دیگر نیز تکرار گردید.

## ۲-۳- آزمایش های جذب سینتیک

تعداد هفت ارلن را که قبلاً اسید شویی شده بود، ابتدا با آب شهر و سپس با آب بدون یون کاملاً شسته و ۱۰۰ میلی لیتر محلول فلز کادمیم با غلظت ۱۰۰ ppb در آن ریخته شد. در هر کدام از ارلن ها، مقدار ۱ گرم جاذب NCRH1 ریخته و pH محلول با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش های قبلی، روی ۶ تنظیم گردید. محلولها بر روی همزن با سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه و به مدت ۵، ۱۰، ۲۵، ۴۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه قرار گرفتند. بعد از زمانهای سپری شده، نمونه ها به ترتیب از روی همزن برداشته شد و با استفاده از قیف شیشه ای و کاغذ صافی واتمن، نمونه ها را در قوطی های پلاستیکی که قبلاً کاملاً شسته شده بود، ریخته و با افزودن مقدار معینی اسید نیتریک، pH آنها به زیر ۲ رسید و بلافاصله برای اندازه گیری مقدار کادمیم در محلول اقدام گردید. این کار برای جاذبهای، NCRH3، NCRH5 و NCRH7 نیز تکرار شد.

## ۳- نتایج و بحث

تجزیه شیمیایی تیمارهای اصلاح شده جاذب نشان داد که پوسته شلتوک اصلاح شده به طور متوسط دارای ۲۶/۹۵ درصد سیلیس، ۲۱/۱۱ درصد کربن و ۵۱/۹۶ درصد اکسیژن می باشد. عنصر

<sup>۱</sup>Scanning Electron Microscope

کادمیم در ترکیب پوسته شلتوک وجود نداشت. بنابراین، پوسته شلتوک مورد آزمایش فاقد کادمیم جذب شده اولیه بوده و خطای ناشی از راندمان جذب، از این حیث منتفی است. از طرفی انتظار می رود با تشکیل گروه های هیدرواکسیل سطحی اتم های سیلیکون و هیدرواکسید کربن، خاصیت جذب سطحی پوسته شلتوک افزایش پیدا کند [۱].

## ۳-۱- مطالعات pH

pH محیطی که فرایند جذب در آن انجام می شود، تأثیر زیادی روی میزان جذب دارد. بخشی از جذب مربوط به یون های هیدروژن است که به عنوان رقیب در جذب سطحی کاتیون ها ظاهر می شود [۵ و ۶].

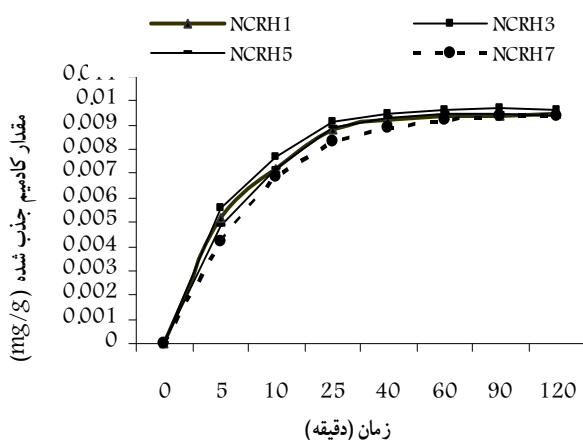
تحقیقات انجام شده توسط سایر محققین نشان داده است که pH بهینه جذب، بین ۴ تا ۸ متغیر است [۷ و ۸]. به همین دلیل، محدوده pH مورد بررسی در این تحقیق، بین ۳ تا ۸ انتخاب و آزمایش های جذب انجام شد.

اثر pH بر روی راندمان جذب کادمیم توسط پوسته شلتوک اصلاح شده در شکل ۱ نشان داده شده است. همان گونه که شکل ۱ نشان می دهد صرف نظر از اینکه پوسته شلتوک با چه میزان از سدیم بی کربنات اصلاح شده باشد، حداقل راندمان جذب در pH = ۳ اتفاق می افتد. راندمان جذب در pH = ۳ برابر ۹۳/۳، ۹۸/۳، ۹۴/۸ و ۹۰/۷ درصد به ترتیب برای جاذبهای NCRH1، NCRH3، NCRH5 و NCRH7 می باشد. با افزایش تدریجی pH، راندمان جذب نیز افزایش می یابد به طوری که در pH = ۶، راندمان جذب کادمیم در تیمارهای فوق الذکر به ترتیب به ۹۷/۶، ۹۹/۱، ۹۸/۶ و ۹۶/۸ می رسد. در pH های ۶ تا ۸ رفتار جاذبها کمی با هم متفاوت است. راندمان جذب در جاذب NCRH1، در pH = ۷ به اندازه ۵/۰ درصد کاهش یافته و سپس در pH = ۸ مجدداً افزایش پیدا کرده است، در صورتی که راندمان جذب برای جاذب NCRH7 از pH = ۶ به بعد، با یک شیب ملایم افزایش می یابد. دو جاذب دیگر، بعد از pH = ۶ نیز مقدار جذبشان تقریباً ثابت باقی می ماند.

همان گونه که در شکل ۱ ملاحظه می شود، افزایش pH از ۳ تا ۵ منجر به افزایش قابل توجه مقدار جذب کادمیم در تمام جاذبها گردیده است. این افزایش نسبتاً سریع در راندمان جذب را می توان ناشی از دو عامل دانست: ۱- وجود مقادیر کافی یون های H<sup>+</sup> در محلول در pH های پایین که برای جذب سطحی با یون مثبت کادمیم رقابت می کنند. ۲- وجود یک دامنه pH بحرانی برای هر یون فلزی هیدرولیز شونده، جایی که راندمان جذب از مقدار خیلی کم به مقدار بیشینه می رسد، که به این مقدار آستانه جذب سطحی گفته می شود [۹]. همچنین، کاهش در جذب یون های کادمیم در pH

### ۳-۲- مطالعات جذب سینتیک

شکل ۲، تغییرات مقدار جذب با زمان تماس را در pH=6 برای تمام تیمارها نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل ۲ نشان می‌دهد، در زمانهای تماس اولیه، سرعت جذب بسیار بالا است به طوری که در ۵ دقیقه اول بیش از ۵۰ درصد غلظت کادمیم جذب گردیده و پس از ۱۰ دقیقه بیش از ۸۰ درصد کادمیم جذب شده است. ولی با گذشت زمان، شدت حذف کادمیم کاهش می‌یابد، به طوری که بعد از ۱/۵ ساعت، مقدار جذب به حداکثر خود می‌رسد و پس از آن شدت جذب تقریباً صفر می‌شود. این موضوع در مورد همه تیمارها صادق است. راندمان جذب در زمان تعادل برای جاذبهای NCRH1، NCRH3، NCRH5، NCRH7 و NCRH3 به ترتیب برابر ۹۴/۲، ۹۵/۹، ۹۵/۰ و ۹۳/۴ درصد می‌باشد. حداکثر جذب سطحی در جاذب NCRH3 اتفاق افتاده است که با نتایج به دست آمده در شکل ۱ مطابقت دارد. زمان تعادل به دست آمده در این تحقیق در تمام تیمارها برابر ۱/۵ ساعت بود که از زمان تعادل به دست آمده در آزمایش‌های کومار و بانندی پادهیای، در کاربرد جاذب پوسته شلتوک اصلاح شده با بی کربنات سدیم ۰/۵ مولار، بیشتر است [۴]. دلیل این امر را می‌توان، اختلاف در مقدار غلظت ورودی کادمیم دانست، زیرا کاهش در میزان غلظت اولیه کادمیم منجر به افزایش زمان تعادل می‌گردد [۷].



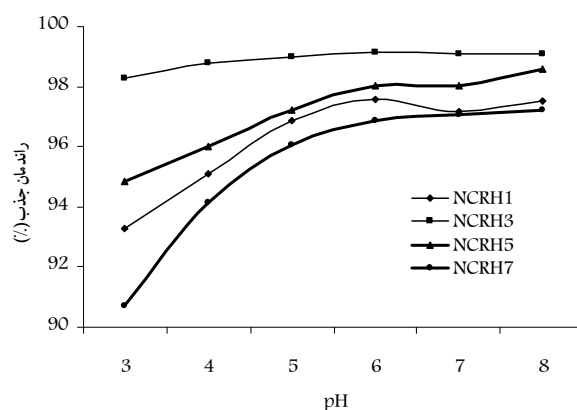
شکل ۲- تأثیر زمان تماس بر میزان جذب کادمیم در تیمارهای مختلف پوسته شلتوک اصلاح شده

برای توصیف جذب سینتیک کادمیم بر روی پوسته شلتوک اصلاح شده، مدل‌های لاگرگرن (۱۸۹۸) و هو و همکاران (۱۹۹۶) که به ترتیب به صورت روابط ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند مورد استفاده قرار گرفت

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (1)$$

بالا تر از ۶ در تیمار NCRH1 احتمالاً به دلیل شکل‌گیری مجموعه‌های هیدروکسیلی حل‌پذیر است [۶، ۱۰]. مقدار جزئی کاهش جذب در pH بالاتر از ۶ در این تحقیق، با نتایج به دست آمده از مطالعات گوپتا و همکاران، کریشنان و انیرودهان و ماتیاگالان و همکاران مطابقت دارد [۱۱، ۱۲ و ۱۳].

مقایسه منحنی‌های شکل ۱ نشان می‌دهد که راندمان جذب در تیمار NCRH3، در تمامی pH ها، به طور چشمگیری از بقیه تیمارها بیشتر است. دلیل این اختلاف را می‌توان در میزان خلل و فرج این تیمار دانست، زیرا شمارش تعداد خلل و فرج نشان داد که تعداد خلل و فرج ایجاد شده بر روی سطح جاذب NCRH3، بیش از ۳ برابر تعداد خلل و فرج تیمار NCRH5، بیش از ۴ برابر خلل و فرج تیمار NCRH7 و بیش از ۱۱ برابر تعداد خلل و فرج تیمار NCRH1 می‌باشد. جدول ۱ نشان می‌دهد که pH بهینه در این تحقیق با نتایج مطالعات ماتیاگالان و همکاران، ماتیاگالان و ویرارغوان، کیف و لیتل و کریشنان و انیرودهان مطابقت دارد [۱۰ و ۱۲-۱۴].



شکل ۱- تأثیر pH بر راندمان جذب یون کادمیم با استفاده از پوسته شلتوک اصلاح شده

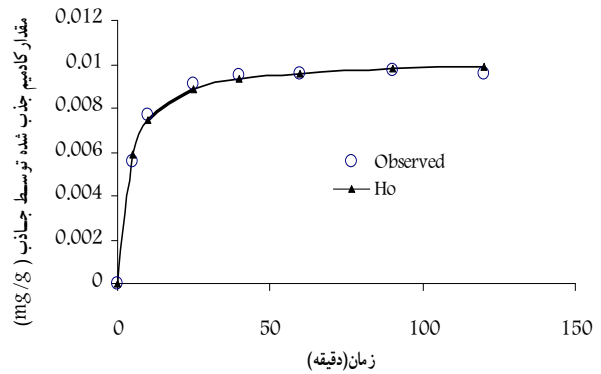
مقایسه راندمانهای جذب تیمارهای پوسته شلتوک اصلاح شده در تحقیق حاضر، نشان می‌دهد که در pH بهینه، مقدار جذب کادمیم در تیمار NCRH5، ۳/۴ درصد بیشتر از تیمار مشابه در مطالعات کومار و بانندی پادهیای است [۴]. همچنین، راندمان جذب در تیمار NCRH3، در pH بهینه، ۲ درصد بیشتر از راندمان جذب در تیمار مشابه در مطالعات شامحمدی و همکاران می‌باشد [۱۵]. در مطالعات ذکر شده، غلظت محلول کادمیم ۱۰ پی پی ام گزارش شده است. این اختلاف می‌تواند به دلیل تفاوت در غلظت اولیه محلول کادمیم باشد زیرا افزایش غلظت اولیه کادمیم باعث کاهش میزان جذب و کوتاه شدن زمان تعادل می‌شود [۷].

بی‌کربنات ۰/۳ مولار، بسیار سریع می‌باشد. این موضوع می‌تواند به غلظت اولیه کادمیم و نوع جاذب به کار رفته بستگی داشته باشد.

### ۳-۳- اثر غلظت محلول سدیم بی‌کربنات بر وضعیت خلل و فرج تیمارهای جاذب اصلاح شده و میزان جذب

مشخصات آماری وضعیت تخلخل در تیمارهای اصلاحی پوسته شلتوک توسط محلول سدیم بی‌کربنات در جدول ۳ ارائه شده است. شمارش تعداد کل خلل و فرج نشان داد که پوسته شلتوک اصلاح شده توسط محلول ۰/۳ مولار کربنات سدیم (NCRH3) دارای بیشترین تعداد خلل و فرج یعنی ۱۱۳ عدد و تیمار NCRH5، دارای ۳۵ عدد خلل و فرج می‌باشد. همچنین، تیمار NCRH7 دارای ۲۵ و واریته NCRH1 دارای ۱۰ عدد خلل و فرج می‌باشد.

تصاویر گرفته شده از دستگاه میکروسکپ الکترونی (SEM) نشان داد که بجز واریته NCRH1، بقیه واریته‌ها تقریباً به طور کامل تحت تأثیر محلول بی‌کربنات قرار گرفته و تخریب شده‌اند ولی علی‌رغم تخریب کل سطح، در این تیمارها، تعداد تخلخل با افزایش غلظت محلول اصلاحی (از ۰/۳ مولار تا ۰/۷ مولار) کاهش پیدا می‌کند (شکل ۴). زیرا تخریب سطح جاذب در غلظتهای بالاتر از ۰/۳ مولار بی‌کربنات سدیم، به صورت افزایش قطر خلل و فرج ظاهر شده و در نتیجه از تعداد کل خلل و فرج کاسته می‌شود. از طرفی، مقایسه راندمانهای جذب بین تیمارهای NCRH1 و NCRH7 در شکل ۴، نشان می‌دهد که افزایش قطر خلل و فرج منجر به کاهش نسبی راندمان جذب می‌گردد. زیرا در تیمار NCRH1 میانگین قطر خلل و فرج برابر ۲/۴ میکرون می‌باشد که کمتر از میانگین قطر خلل و فرج در تیمار NCRH7 (۷/۷ میکرومتر) است، ولی راندمان جذب آن (۹۷/۶ درصد) بیشتر از راندمان جذب NCRH7 (۹۶/۹ درصد) می‌باشد. این موضوع می‌تواند در مورد بقیه تیمارها نیز صادق باشد. بنابراین به نظر می‌رسد بهتر است اثر همزمان قطر و تعداد کل خلل و فرج ایجاد شده بر روی سطح جاذب، بر افزایش راندمان در نظر گرفته شود. به همین دلیل، رابطه بین راندمان جذب و نسبت تعداد خلل و فرج به میانگین قطر خلل و فرج (N/D) مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار با استفاده از نرم افزار SPSS (نسخه ۹) و آنالیز رگرسیون تخمین منحنی، راندمان جذب در مقابل N/D ترسیم گردیده و در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۳- برازش مدل هو و همکاران بر نقاط مشاهده شده جذب کادمیم توسط جاذب NCRH3 با زمان

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{2kq_e} + \frac{t}{q_e} \quad (2)$$

که در آن

$q_e$  مقدار کادمیم جذب شده در حالت تعادل (mg/g)،  $q_t$  مقدار کادمیم جذب شده در زمان  $t$  (mg/g)،  $k_1$  ضریب ثابت شدت جذب لاگروگن ( $h^{-1}$  یا  $min^{-1}$ )،  $k$  ثابت جذب سطحی شرایط ثانویه ساختگی (یا  $g/mg.h$  یا  $g/mg.m.min$ ) و  $t$  زمان (min) می‌باشند.

نتایج حاصل از آزمایش‌های قبلی نشان داد که پوسته شلتوک اصلاح شده با ۰/۳ مولار سدیم بی‌کربنات (NCRH3) از راندمان جذب بهتری نسبت به دیگر تیمارها، برخوردار است. بنابراین با استفاده از نرم افزار SPSS (نسخه ۹) و آنالیز رگرسیون غیرخطی، مدل هو و همکاران، با نتایج حاصل از آزمایش‌های جذب سینتیک تیمار NCRH3 برازش و در شکل ۳ نشان داده شده است. اگر چه هر دو مدل داده‌های انرژی جنبشی را در سطح اعتماد ۹۵ درصد توصیف کردند ولی مدل لاگروگن (۱۸۹۸) در مقایسه با مدل هو و همکاران (۱۹۹۶)، داده‌ها را بهتر توصیف کرد. جدول ۱، ضرایب مدل‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود،  $(1/min)$   $k_1$  و  $k = 1/32 (g/mg-min)$  یا در حالتی که زمان برحسب ساعت در نظر گرفته شده باشد،  $k_1 = 10/08 (1/h)$  و  $k = 79/2 (g/mg-h)$  می‌باشد. مقایسه این ضرایب با ضرایب به دست آمده به وسیله سایر محققین (جدول ۲) نشان می‌دهد که جذب سطحی کادمیم بر روی پوسته شلتوک اصلاح شده با سدیم

جدول ۱- پارامترهای مدل‌های لاگروگن و هو و همکاران در سطح اعتماد ۹۵ درصد

مدل	معادله	R <sup>2</sup> *
لاگروگن	$q_t = 0.095 [(1 - \exp(-0.168 t))]$	۰/۹۹۸
هو و همکاران	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{[2(1.32)(0.1019)^2]} + \frac{t}{(0.1019)}$	۰/۹۹۶

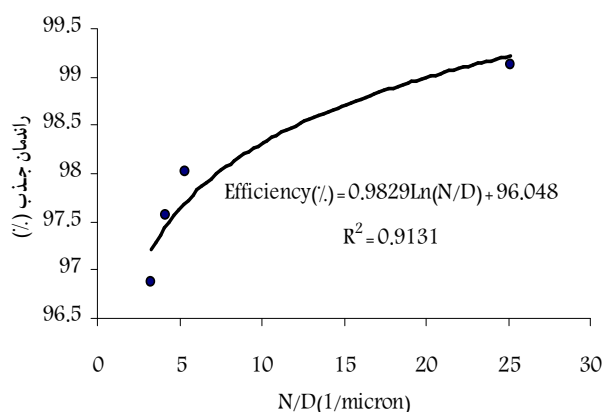
\* پارامترهای مدل لاگروگن و هو و همکاران در سطح اعتماد ۹۵ درصد به دست آمده است.

جدول ۲- مقایسه ضرایب مدل‌های لاگرگرن و هو در جذب کادمیم

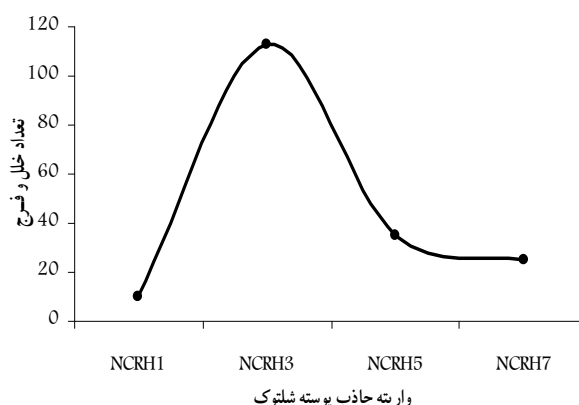
مرجع	ضریب مدل هو (K(g/mg-h))	ضریب مدل لاگرگرن (K <sub>i</sub> (L/h))	غلظت کادمیم (mg/L)	جاذب
[۱۳]	۳/۶۷	۳/۲۹	۱	پرلایت
[۱۲]	۱۲/۵۶	۴/۷	۱	قارچ <i>A. biusporus</i>
[۱۳]	۵۰/۵۴	۱۰/۰۱	۱	قارچ <i>L. edodes</i>
[۸]	-	۰/۰۱۳۴	-	پیت
[۱۶]	-	۰/۴۴	۱۰	Pretreated <i>A. niger</i>
مطالعه حاضر	۷۹/۲	۱۰/۰۸	۰/۱	پوسته شلتوک اصلاح شده با ۰/۳ مولار سدیم بی کربنات

جدول ۳- مشخصات آماری وضعیت خلل و فرج تیمارهای پوسته شلتوک اصلاح شده توسط محلول سدیم بی کربنات

NCRH7	NCRH5	NCRH3	NCRH1	مشخصات آماری
۱۰	۱۱۳	۳۵	۲۵	تعداد خلل و فرج (N)
۲/۴	۴/۵	۶/۵	۷/۷	میانگین قطر خلل و فرج (D میکرون)
۴/۲	۲۵/۱	۵/۴	۳/۳	N/D



شکل ۵- رابطه بین تعداد و قطر خلل و فرج با حداکثر راندمان جذب در پوسته شلتوک اصلاح شده



شکل ۴- اثر غلظت محلول سدیم بی کربنات بر تعداد خلل و فرج پوسته شلتوک

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج حاصله از تحقیق حاضر نشان داد که:

الف) مقدار pH بهینه جذب در تمامی تیمارهای جاذب برابر ۶ است.

ب) حداکثر راندمان جذب کادمیم به وسیله پوسته شلتوک اصلاح شده با محلول سدیم بی کربنات ۰/۳ مولار (تیمار NCRH3) اتفاق می افتد و مقایسه نتایج مطالعات حاضر با مطالعات دیگران نشان می دهد که راندمان جذب در غلظتهای پایین قابل توجه می باشد و به

حداکثر ۹۹/۱ درصد می رسد.

ج) مدل لاگرگرن داده های انرژی جنبشی را به خوبی توصیف نموده و ضرایب به دست آمده نشان می دهد که سرعت جذب بسیار بالا است.

د) بررسی رابطه بین راندمان جذب، تعداد و قطر تخلخل نیز نشان داد که همبستگی خوبی بین مقدار جذب و نسبت تعداد به میانگین قطر خلل و فرج (N/D) جاذب وجود دارد.

- 1- Larson, V. J., and Schierup, H. H. (1981). "The use of straw for removal of metals from wastewater." *J. Environ. Qual.*, 10, 188-193.
- 2- Ajmal, M., Rao, R. A. K., Anwar, S., Ahmad, J., and Ahmad, R. (2003). "Adsorption studies on rice husk: removal and recovery of Cd(II) from wastewater." *Bioresour. Technology*, 86(2), 147-149.
- 3- Teixeira Tarley, C. R., Costa Ferreira, S. L., and Zezzi Arrud, M. R. (2004). "Use of modified rice husks as a natural solid adsorbent of trace metals: characterisation and development of an on-line preconcentration system for cadmium and lead determination by FASS." *Microchemical Journal*, 77, 163-175.
- 4- Kumar, U., and Bandypadhyay, M. (2006). "Sorption of cadmium from aqueous solution using pretreated rice husk." *Bioresour. Technology*, 97, 104-109.
- ۵- اکبری، ت. (۱۳۸۴). "بررسی کاربرد باگاس به عنوان یک جاذب طبیعی ارزان قیمت به منظور حذف روی، سرب و کادمیم از آب." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات اهواز.
- ۶- رستمی، ص. (۱۳۸۰). "کاربرد موی انسان در حذف فلزات سنگین از محیط آبی (کادمیم و سرب)." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات اهواز.
- ۷- جودکی، م. (۱۳۷۶). "جذب کادمیم از فاضلاب صنعتی با استفاده از قارچ." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان.
- 8- Raji, C., Manju, G. N., and Anirudhan, T. S. (1997). "Removal of heavy metal ions from water using sawdust-based activated carbon." *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 4, 254-260.
- 9- Viraraghavan, T., and Rao, A. K. (1991). "Adsorption of cadmium and chromium from wastewater by fly ash." *J. Environ. Sci. Health*, A26, 721-753.
- 10- Mathialagan, T., and Viraraghavan, T. (2002). "Adsorption of cadmium from aqueous solutions by perlite." *Journal of Hazardous Materials*, B 94, 291-303.
- 11- Gupta, V. K., Jain, C. K., Ali, I., Shahram, M., and Saini, V. K. (2003). "Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste." *Water Research*, 37(16), 4038-4044.
- 12- Krishnan, A. A., and Anirudhan, T. S. (2003). "Removal of cadmium (II) from aqueous solutions by steam activated sulphurised carbon prepared from sugar-cane bagasse pith: kinetics and equilibrium studies." *Water S. A.*, 29(2), 147-156.
- 13- Mathialagan, T., Viraraghavan, T., and Cullimore, D. R. (2003). "Adsorption of cadmium from aqueous solutions by edible mushrooms." *Water Qual. Res. J. Canada*, 38(3), 499-514.
- 14- Kiff, R. J., and Little, D. R. (1986). *Biosorption of heavy metals by immobilized fungal biomass*, In: *Immobilization of ions by biosorption*, H. H. Eccles, and S. Hunt, eds., Ellis Horwood, Chichester, West Sussex, England.
- ۱۵- شامحمدی حیدری، ز.، معاضد، ه.، جعفرزاده حقیقی، ن. ا.، و سعادت، ن. (۱۳۸۵). "بررسی تأثیر مولاریته سدیم بی‌کربنات بر افزایش ظرفیت جاذب پوسته شلتوک در تصفیه فلز سمی کادمیم از محیط آبی." *اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوضه کارون و زاینده رود، شهرکرد.*
- 16- Kapoor, A., Viraraghavan, T., and Cullimore, D. R. (1999). "Removal of heavy metals using the fungus *Aspergillus niger*." *Bioresour. Technology*, 70, 99-104.