

## بررسی کارایی کربن فعال در جذب سطحی کروم شش ظرفیتی از جریان هوا

الهام رحمان زاده<sup>۱</sup> - فریده گلبابایی<sup>۲</sup> - علی فقیهی زرنندی<sup>۲</sup> - سید غلامرضا موسوی<sup>۳\*</sup> - محمدرضا بانسی<sup>۵</sup>  
*moussavi@modares.ac.ir*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۱۹

### مکیده

**مقدمه:** کروم شش ظرفیتی ( $Cr^{+6}$ ) یک اکسیدکننده بسیار قوی است که علیرغم کاربردهای فراوان در انواع صنایع، بر حسب مدت مواجهه می‌تواند منجر به سرطان ریه، زخم‌های عمیق (در دست، بازو، زبان و سقف دهان)، سوراخ شدن تیغه بینی، سوزش و التهاب در بینی، ریه‌ها و قسمت فوقانی دستگاه تنفس، آسم، درماتیت تماسی، آسیب به کلیه و کبد و حساسیت پوستی شود. هدف از انجام این مطالعه، سنجش کارایی کربن فعال در جذب سطحی کروم (VI) از جریان هوا و پارامترهای موثر بر آن است.

**روش کار:** در این مطالعه تجربی از دستگاه نوبولایزر (مهپاش) به عنوان مولد میست کروم استفاده شد و عوامل موثر بر آن از قبیل میزان جریان هوا (۱ و ۳ لیتر بر دقیقه)، غلظت اولیه کروم (۰/۰۵، ۰/۱۵، ۰/۱ و ۱۰ میلی‌گرم بر مترمکعب) و عمق بستر جذب (۵، ۲/۵ و ۱۰ سانتی‌متر) بررسی گردید. به منظور تسهیل در پیش‌بینی عمل کرد ستون جذب کربن فعال، از مدل یون-نلسون و توماس و برای تعیین میزان تطابق مدل با داده‌های واقعی، از آزمون هم‌بستگی استفاده شد.

**یافته‌ها:** ظرفیت جذب کربن فعال با افزایش عمق بستر جذب، افزایش یافته اما با افزایش میزان جریان هوا و غلظت ورودی، کاهش پیدا کرد. نتایج نشان داد مدل یون-نلسون و توماس با ضریب هم‌بستگی بالاتر از ۰/۹۹۵۳، با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت دارند.

**نتیجه‌گیری:** نتایج این مطالعه نشان داد که کربن فعال کارایی بالایی در جذب سطحی کروم (VI) دارد، به طوری که راندمان آن در میزان جریان ۳ لیتر بر دقیقه، عمق بستر ۵ سانتی‌متر و غلظت ۲۰ و ۲۰۰ برابر TLV به ترتیب ۸۵/۴۲ و ۷۱/۸۳ درصد است.

**کلمات کلیدی:** جذب سطحی، کروم شش ظرفیتی هوابرد، کربن فعال، مدل یون-نلسون، مدل توماس

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، بجنورد، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران

۴- استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۵- دانشیار، گروه اپیدمیولوژی و آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران

### مقدمه

کروم شش ظرفیتی به عنوان یک اکسیدکننده بسیار قوی به صورت آزاد در طبیعت وجود ندارد ولی در فرآیندهای برخی از صنایع تولید می‌شود (۱-۶). کروم در آب‌کاری، صنعت سیمان، جوش‌کاری، نساجی، عکاسی، لیتوگرافی و در تولید رنگ‌دانه‌ها و فولاد ضد زنگ، مواد نگه‌دارنده چوب، مواد منفجره، ساخت صفحات الکتریکی و باتری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱-۴، ۷، ۸). کروم شش ظرفیتی بر حسب غلظت و مدت مواجهه، تاثیرات سمی زیادی بر بدن انسان داشته و امروزه به عنوان یک عامل سرطان‌زای انسانی شناخته شده است (۱، ۲، ۹). سرطان ریه، زخم‌های عمیق (در دست، بازو، زبان و سقف دهان)، سوراخ شدن تیغه بینی، سوزش ریه‌ها، آسم، آسیب به کلیه و کبد و حساسیت پوستی از اثرات عمده مواجهه با کروم شش ظرفیتی است (۱-۴، ۱۰). مقادیر حدود مجاز مواجهه شغلی کروم شش ظرفیتی مطابق با استاندارد ACGIH، NIOSH و OSHA به ترتیب برابر با ۰/۰۵، ۰/۰۰۰۲ و ۰/۰۰۵ میلی‌گرم بر مترمکعب می‌باشد (۱۱). با توجه به این‌که کروم شش ظرفیتی علی‌رغم سرطان‌زایی، کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارد، کنترل آن امری ضروری است.

طبق مطالعات انجام شده، در حال حاضر اکثر صنایعی که در آن‌ها فیوم، میست یا بخار کروم تولید می‌شود، از هودهای مکشی یا اسکرابر با بستر انباشته (PBS) برای کاهش انتشارات کروم هوابرد استفاده می‌کنند (۱، ۲، ۱۲). اگر خروجی هودهای مکشی پالایش نشود مستقیماً وارد محیط زیست شده و پیامدهای ناشی از آن به وجود خواهد آمد. خروجی اسکرابره‌های بستر انباشته (PBS) فاضلابی حاوی کروم بوده که پاک‌سازی آن دارای هزینه عملیاتی

بالا، راندمان کم و تولید زایداتی سمی است که اغلب نیاز به پاک‌سازی بیش‌تری دارند (۱، ۲، ۱۲). در سال‌های اخیر، جاذب‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های حذف آلاینده از محیط‌های کاری مورد توجه قرار گرفته است. در زمینه جذب یا حذف کروم از فاضلاب و محیط‌های مایع مطالعات فراوانی انجام شده است و مطالعات محدودی نیز در خصوص جذب غیرمستقیم کروم از جریان هوا (انتقال کروم از هوا به محیط مایع و سپس جذب سطحی از مایع) انجام شده است (۱۳)؛ اما طبق بررسی‌های به عمل آمده در منابع قابل دسترسی در زمینه جذب مستقیم کروم (VI) از جریان هوا به جز مطالعه ای که توسط این تیم تحقیقاتی در سال ۱۳۹۲ انجام شد، تا کنون مطالعه دیگری صورت نگرفته است (۳). با توجه به مطالعات محدود جهت کنترل کروم شش ظرفیتی هوابرد در محیط‌های شغلی، کاربردهای گوناگون آن در صنایع مختلف و عوارضی که بر افراد در معرض مواجهه با آن دارد، این مطالعه با هدف تعیین کارایی کربن فعال در جذب سطحی کروم شش ظرفیتی هوابرد و عوامل موثر بر آن انجام شد.

### روش کار

در این مطالعه تجربی که در مقیاس آزمایش‌گاهی انجام شد، تاثیر غلظت آلاینده ورودی به بستر جذب، میزان جریان هوای ورودی به آن و عمق بستر جذب بر کارایی جذب سطحی کروم شش ظرفیتی از جریان هوا بر روی جاذب کربن فعال مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۱- آماده سازی جاذب

ابتدا برای آماده‌سازی گرانول‌های کربن فعال (تهیه شده از شرکت مرک آلمان) به عنوان

بستر جاذب، گرانول‌ها با آسیاب خرد شد و سپس با استفاده از الک‌های آزمایش‌گاهی استاندارد (ASTME11) با مش ۱۶/۲۰ (۱/۱۹-۰/۸۴ mm)، دانه بندی گردید. پس از شستشوی گرانول‌های دانه بندی شده با آب مقطر به منظور حذف ناخالصی‌ها، به مدت ۲۴ ساعت در دمای °C ۱۰۰ در آون قرار داده شد تا خشک شود (۱۴).

### ۲- آماده سازی مواد شیمیایی

ساخت محلول استوک و تنظیم pH نمونه، مطابق مطالعه قبل انجام شد (۳).

### ۳- تعیین خصوصیات کربن فعال

ویژگی‌های داخلی کربن فعال از جمله سطح ویژه جذب، حجم و ابعاد منافذ به کمک روش BET اندازه‌گیری شد. برای بررسی مورفولوژی کربن فعال از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل XL۳۰ ساخت شرکت فیلیپس هلند استفاده شد. آزمایشات مربوط به شناسایی ساختار و تعیین درصد عناصر در کربن فعال به ترتیب به وسیله روش XRD و XRF مدل Xpert MPD شرکت فیلیپس هلند انجام شد.

### ۴- مشخصات ستون جذب

برای تولید میست کروم شش ظرفیتی از دستگاه نبولایزر (مهپاش) مدل 3A، ساخت کشور ایتالیا استفاده شد. آزمایش‌های جذب سطحی در یک راکتور ستونی با جریان پایین رو و رژیم پیوسته انجام شد. مشخصات ستون جذب و شرایط هر آزمایش از نظر مقدار متغیرها، زمان و دما مطابق مطالعه قبل بود (۳). غلظت آلاینده ورودی (۰/۰۵، ۰/۱۵، ۱ و ۱۰ میلی‌گرم بر مترمکعب)،

مقدار جاذب (۲/۵، ۵ و ۱۰ سانتی‌متر) و میزان جریان هوای خروجی از نبولایزر (۱ و ۳ لیتر بر دقیقه) به عنوان متغیرهای مورد بررسی انتخاب شدند. در هر آزمایش ۵ میلی‌لیتر از محلول دی کرومات پتاسیم با یک غلظت مشخص وارد مخزن نبولایزر شد (گنجایش مخزن نبولایزر ۵ میلی‌لیتر بود) و نمونه برداری با فواصل ۹۰ دقیقه تا رسیدن به نقطه اشباع ادامه یافت و بیش از ۱۱۹۰ مورد نمونه برداری انجام و مورد آنالیز قرار گرفت.

### ۵- آنالیز نمونه

جهت تعیین غلظت میست کروم، خروجی ستون جذب به سه ایمپینجر سری (جهت اطمینان از عدم خروج آلاینده از ایمپینجر) هدایت شد و تعیین غلظت کروم در ایمپینجر به همان روش مطالعه قبل انجام شد (۳). میزان جذب نمونه به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر (Unico SQ-4802 UV/Vis) و در طول موج ۵۴۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. غلظت کروم موجود در هر ایمپینجر، به کمک منحنی کالیبراسیون محلول‌های استاندارد کروم شش ظرفیتی با غلظت‌های ۱۰۰-۱۲۰۰ میکروگرم بر لیتر محاسبه شد و سپس غلظت کروم شش ظرفیتی اولیه و نهایی در جریان هوا، بر اساس موازنه جرم و حجم هوای عبوری از ستون جذب تعیین گردید.

### ۶- کمی سازی ستون جذب

طراحی موفق ستون جذب سطحی، نیازمند پیش‌بینی پروفایل غلظت-زمان (منحنی شکست)، زمان نقطه شکست، نقطه اشباع و حداکثر ظرفیت جذب یک جاذب می‌باشد (۱۵).

جدول ۱. معادله‌های کاربردی در این پژوهش و پارامترهای هر معادله

| معادله                                     | پارامتر  | تعریف هر پارامتر                                   |
|--|--|--|
| مدل یون-نلسون                              | $C_0$  | غلظت کروم ورودی به ستون جذب ( $mg/m^3$ )           |
|  | $C_t$  | غلظت کروم خروجی از ستون جذب در زمان t ( $mg/m^3$ ) |
|  | $K_{YN}$   | ثابت یون-نلسون ( $h^{-1}$ )                        |
|  | $\tau$   | زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد منحنی شکست (h)     |
| مدل توماس                                  | $K_{Th}$   | ثابت توماس ( $m^3/mg \cdot h$ )                    |
|  | $q_0$  | حداکثر ظرفیت جذب ( $mg/g$ )                        |
|  | $m$  | جرم جاذب (gf)                                      |
|  | $Q$  | میزان جریان هوا ( $m^3/h$ )                        |
|  | $t$  | زمان نمونه‌برداری (h)                              |
| راندمان جذب (%)                            | $t_s$  | زمان رسیدن به نقطه اشباع (h)                       |
|  | $Q$  | میزان جریان هوای عبوری از بستر جذب ( $m^3/min$ )   |
| ظرفیت جذب در نقطه شکست ( $mg/g$ )          | $m$  | جرم جاذب (gf)                                      |
|  | $t$  | زمان (h)   |
| نسبت جرم کروم ورودی به جرم جاذب ( $mg/g$ ) | $Q$  | میزان جریان هوای ورودی به ستون جذب ( $m^3/h$ )     |
|  | $C$  | غلظت اولیه کروم ۶ ظرفیتی ( $mg/m^3$ )              |
|  | $t_{bk}$   | زمان نقطه شکست (h)                                 |
|  | $M_{adsorbent}$  | جرم ماده جاذب (gf)                                 |
| میزان جاذب مورد استفاده ( $g/mg$ )         | پارامترها و تعاریف آن‌ها مانند موارد ذکر شده در معادله BC می‌باشد. |  |
|  | $AUR = \frac{M_{adsorbent}}{Q \cdot C \cdot t_{bk}}$               |  |
| ظرفیت ویژه ( $m^3/h$ )                     | $ST = \frac{Q \cdot t_{bk}}{M_{adsorbent}}$                        |  |

جدول ۲. ویژگی‌های بافتی کربن فعال

| قطر متوسط منافذ (nm) | حجم منافذ ( $cm^3/g$ ) | سطح ویژه ( $m^2/g$ ) |
|----------------------|------------------------|----------------------|
| ۱/۷                  | ۰/۵۱۹۶                 | ۱۲۱۲                 |

معادله مدل یون-نلسون برای پیش بینی رفتار نقطه شکست و راندمان یک جاذب در جذب گازها به کار می‌رود و معادله مدل توماس برای تعیین حداکثر ظرفیت جذب یک جاذب و میزان جذب استفاده می‌شود. در معادله یون-نلسون، مقادیر  $K_{YN}$  و  $\tau$  به ترتیب از شیب و عرض از مبدا منحنی رگرسیون نمودار  $\ln[C_t/C_0 - C_t]$  در برابر زمان نمونه برداری (t) محاسبه می‌شود و در معادله توماس، مقادیر  $K_{Th}$  و  $q_0$  با رسم نمودار

(۱۶). در این مطالعه به منظور پیش‌بینی عمل کرد ستون جذب کربن فعال، داده‌های آزمایش‌گاهی با مدل‌های یون-نلسون و توماس مطابقت داده شد. مدل یون-نلسون بر مبنای فرضیه تناسب بین کاهش احتمال جذب و افزایش احتمال شکست برای هر مولکول جذب شده استوار است و فرضیه مدل توماس این است که رفتار جریان در بستر جذب به صورت جریان قالبی است و هیچ اختلاطی در ستون جذب وجود ندارد.

مواد آلی می‌سوزند و مواد معدنی با اکسیژن ترکیب شده و دستگاه XRF، درصد اکسیدهای معدنی را مشخص می‌کند. در نمونه کربن فعال مورد آزمایش، ۹۷ درصد ماده آلی کربن و ۳ درصد سایر عناصر وجود داشت که در جدول ۳ میزان این اکسیدهای معدنی نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است بیش‌ترین ترکیب تشکیل دهنده این نمونه (در بین عناصر معدنی)  $\text{CaO}$ ،  $\text{SiO}_2$  و  $\text{SO}_3$  می‌باشد. مورفولوژی سطحی کربن فعال به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکل ۱ و الگوی پراکنش حاصل از XRD در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، کربن فعال ساختار غیر کریستالی و آمورف دارد.

تاثیر غلظت ورودی در کارایی جذب کروم شش ظرفیتی  
جذب کروم شش ظرفیتی در غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۱۵، ۱ و ۱۰ میلی‌گرم بر مترمکعب با عمق بستر

$\ln[\text{Ct}/\text{C0}-1]$  در برابر زمان و از روی شیب و عرض از مبدا منحنی مذکور به دست می‌آید (۱۷-۲۳).  
زمان نقطه شکست در این مطالعه، زمانی در نظر گرفته شد که نسبت غلظت در زمان  $t$  (C) به غلظت اولیه (C0) برابر ۰/۰۵ بود (۲۱)، معادلات مربوط به مدل‌های یون-نلسون (۲۴) و توماس و نیز پارامترهایی مانند راندمان جذب (%R)، ظرفیت جذب در نقطه شکست (q)، میزان جاذب مورد استفاده (AUR) و ظرفیت ویژه (ST) در جدول ۱ آمده است (۱۷، ۲۳، ۲۵).

### یافته ها

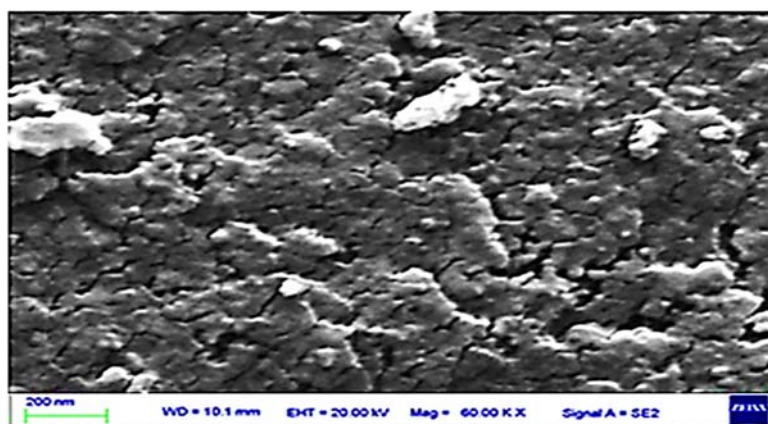
#### ۱- مشخصات جاذب

در جدول ۲ ویژگی‌های بافتی کربن فعال از جمله مساحت سطح، حجم منافذ و میانگین قطر منافذ نشان داده شده است.  
آزمایش XRF در دماهای خیلی بالا (۱۲۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) انجام می‌شود که در این دما

جدول ۳. عناصر معدنی تشکیل دهنده کربن فعال

| LOI* | Zn  | Cl  | SO <sub>3</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | CaO | MgO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | ترکیبات (WT.%) |
|------|-----|-----|-----------------|-------------------------------|-----|-----|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|----------------|
| ۰/۶  | ۱/۷ | ۵/۸ | ۲۰/۶            | ۱/۱                           | ۲۶  | ۱/۱ | ۱۱/۷                           | ۲                 | ۳/۵                            | ۲۵/۹             |                |

\*Loss On Ignition



شکل ۱. مورفولوژی سطحی کربن فعال

۵ سانتی‌متر و میزان جریان ۳ لیتر بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت ورودی به بستر جذب، زمان رسیدن به نقطه شکست و اشباع کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۳ نشان داده شده است.

تاثیر میزان جریان ورودی در کارایی جذب کروم شش ظرفیتی

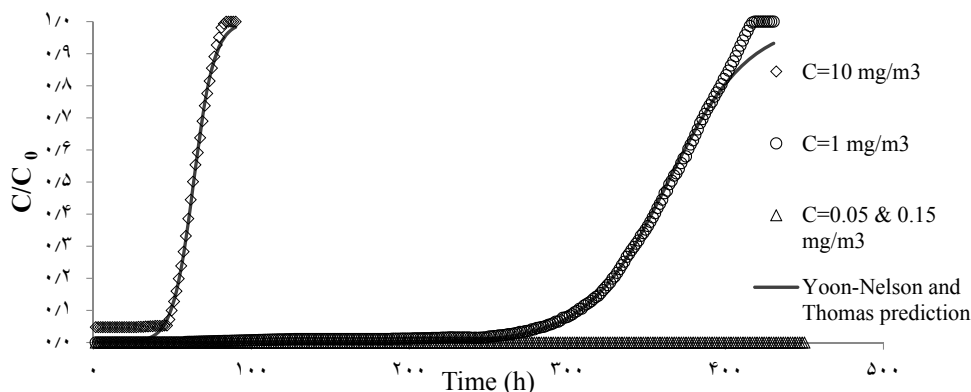
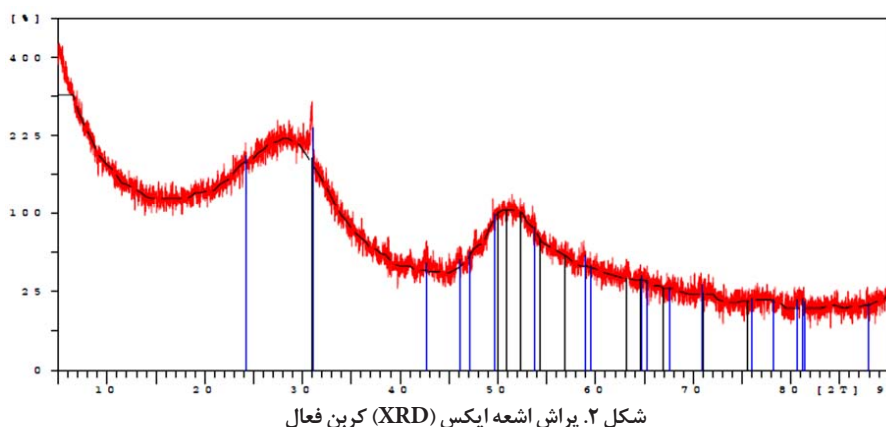
به منظور تعیین دبی بهینه، میزان جریان‌های ۱ و ۳ در عمق بستر ۵ سانتی‌متر و غلظت ورودی ۱۰ میلی‌گرم بر مترمکعب مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایشات در میزان جریان ۱ لیتر بر دقیقه به نقطه شکست نرسید (شکل ۴) لذا تصمیم بر آن شد که با میزان جریان ۳ لیتر بر دقیقه آزمایشات ادامه داده شود.

تاثیر عمق بستر جذب در کارایی جذب کروم شش ظرفیتی

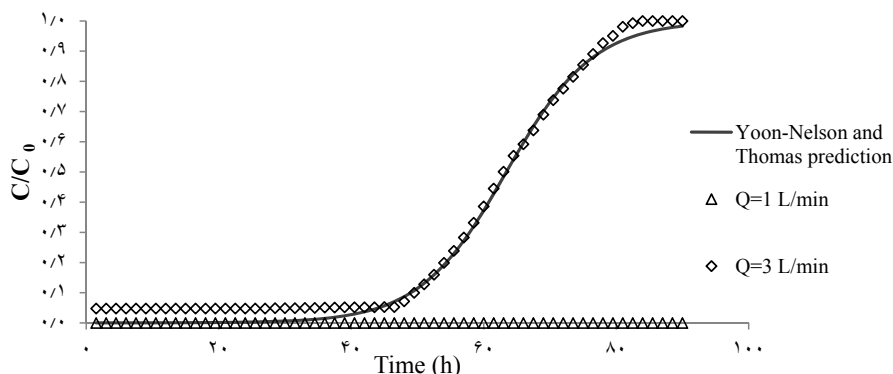
جذب کروم شش ظرفیتی در ارتفاع‌های ۲/۵، ۵ و ۱۰ سانتی‌متر از جاذب کربن فعال و با غلظت ورودی ۱۰ میلی‌گرم بر مترمکعب از کروم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشات نشان داد که میزان کارایی با افزایش عمق بستر جذب، افزایش می‌یابد (شکل ۵).

مدل‌های ستون جذب

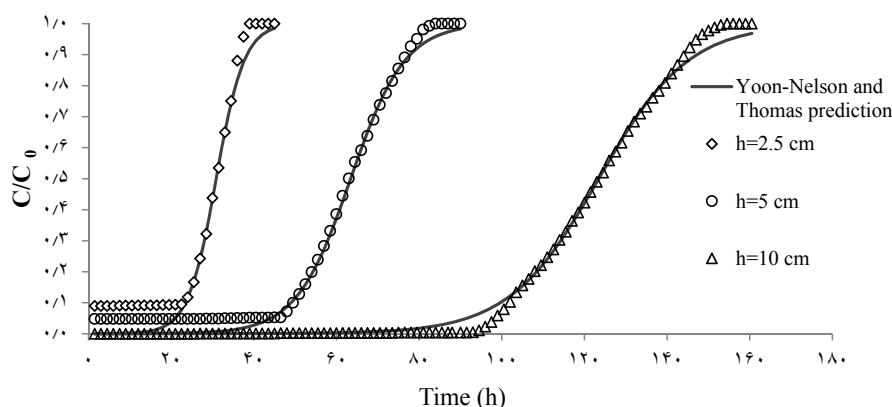
همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، اطلاعات مدل یون-نلسون و توماس با ضریب هم‌بستگی بالای ۰/۹۹۵۳ بر داده‌های حاصل از انجام آزمایشات منطبق است.



شکل ۳. تاثیر غلظت ورودی در کارایی جذب کروم شش ظرفیتی (میزان جریان ۳ لیتر بر دقیقه و عمق بستر جذب ۵ سانتی‌متر)



شکل ۴. تاثیر میزان جریان ورودی در کارایی جذب کروم شش ظرفیتی (عمق بستر جذب ۵ سانتی متر و غلظت ۱۰ میلی گرم بر مترمکعب)



شکل ۵. تاثیر عمق بستر جذب در کارایی جذب کروم شش ظرفیتی (جریان هوا ۳ لیتر بر دقیقه و غلظت کروم ۱۰ میلی گرم بر مترمکعب)

### بحث

در این گروه از آزمایشات، نیروی پیش برنده فرآیند جذب با افزایش غلظت کروم شش ظرفیتی ورودی به بستر جذب، افزایش می‌یابد لذا مکان‌های جذب سریع‌تر پر شده و زمان رسیدن به نقطه شکست کاهش می‌یابد (۳، ۴، ۱۸، ۲۶-۲۸). شیب نقطه شکست در غلظت‌های پایین، کم‌تر است و زمان رسیدن به نقطه اشباع طولانی‌تر می‌شود که این نشان می‌دهد ناحیه انتقال جرم (MTZ) در غلظت‌های پایین وسیع‌تر است ولی در غلظت‌های بالاتر شیب نقطه شکست بیش‌تر بوده و ناحیه انتقال جرم کوچکتر است. نتایج مشابهی در سایر مطالعات جذب سطحی ارائه شده است (۳،

در شکل ۳ اثر غلظت کروم شش ظرفیتی ورودی به بستر جذب بر کارایی جذب سطحی آن، با عمق بستر ۵ سانتی متر و میزان جریان هوای ۳ لیتر بر دقیقه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در غلظت‌های ۰/۰۵ و ۰/۱۵ میلی‌گرم بر مترمکعب بعد از ۴۵۰ ساعت نمونه برداری همواره راندمان ۱۰۰ درصد بود و منحنی به نقطه شکست نرسید اما در غلظت‌های ۱ و ۱۰ میلی‌گرم بر مترمکعب به ترتیب شکست منحنی در ۴۵ و ۲۸۶/۵ ساعت و اشباع آن در ۸۴ و ۴۱۸/۵ ساعت اتفاق افتاد. طبق نتایج به‌دست آمده

جدول ۴. نتایج مدل‌های جذب یون- نلسون و توماس

| پارامترهای مدل یون- نلسون و مدل توماس |                 |                       |        |  |                                    | زمان شکست (h) | عمق بستر جذب (cm) | غلظت ورودی (mg/m <sup>3</sup> ) | میزان جریان هوا (L/min) |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------------|--------|--|------------------------------------|---------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------|
| R <sub>Th</sub>                       | R <sub>YN</sub> | q <sub>0</sub> (mg/g) | τ(h)   | K <sub>Th</sub> (m <sup>3</sup> /mg.h) | K <sub>YN</sub> (h <sup>-1</sup> ) |               |                   |                                 |                         |
| *                                     | *               | *                     | *      | *                                      | *                                  | >۹۰           | ۵                 | ۱۰                              | ۱                       |
| ۰/۹۹۵۳                                | ۰/۹۹۵۳          | ۴۴/۴۹                 | ۳۰/۹۰  | ۰/۰۳                                   | ۰/۳۰                               | ۲۲/۵          | ۲/۵               | ۱۰                              | ۳                       |
| ۰/۹۹۸۵                                | ۰/۹۹۸۵          | ۴۵/۶۷                 | ۶۳/۴۳  | ۰/۰۲                                   | ۰/۱۵                               | ۴۵            | ۵                 | ۱۰                              | ۳                       |
| ۰/۹۹۸۸                                | ۰/۹۹۸۸          | ۴۴/۴۴                 | ۱۲۳/۴۵ | ۰/۰۱                                   | ۰/۰۹                               | ۸۴            | ۱۰                | ۱۰                              | ۳                       |
| ۰/۹۹۸۵                                | ۰/۹۹۸۵          | ۲۶/۱۸                 | ۳۶۳/۶۷ | ۰/۰۴                                   | ۰/۰۴                               | ۲۸۶/۵         | ۵                 | ۱                               | ۳                       |

\* در این آزمایشات غلظت کروم در جریان خروجی از بستر جذب پس از زمان‌های طولانی همواره صفر بوده و تعیین پارامترهای مشخص شده امکان پذیر نیست.

جدول ۵. خلاصه عمل کرد کربن فعال در جذب سطحی کروم شش ظرفیتی

| Efficiency (%) | ST (m <sup>3</sup> /g) | AUR (g/mg) | BC (mg/g) | t <sub>b</sub> (h) | عمق بستر جذب (cm) | غلظت ورودی (mg/m <sup>3</sup> ) | میزان جریان هوا (L/min) |
|----------------|------------------------|------------|-----------|--------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------|
| ۷۱/۳۹          | ۳/۲۴                   | ۰/۰۳۱      | ۳۲/۴۰     | ۲۲/۵               | ۲/۵               | ۱۰                              | ۳                       |
| ۷۱/۸۳          | ۳/۲۴                   | ۰/۰۳۱      | ۳۲/۴۰     | ۴۵                 | ۵                 | ۱۰                              | ۳                       |
| ۷۹/۴۷          | ۳/۳۵                   | ۰/۰۳۰      | ۳۳/۴۸     | ۹۳                 | ۱۰                | ۱۰                              | ۳                       |
| ۸۵/۴۲          | ۲/۰۶۳                  | ۰/۰۴۸      | ۲۰/۶۳     | ۲۸۶/۵              | ۵                 | ۱                               | ۳                       |

پایین‌تر به دلیل سرعت جریان هوای کمتر و زمان ماند بیشتر، آلاینده برای جذب فرصت بیشتری داشته و کارایی جذب افزایش می‌یابد. با افزایش میزان جریان هوای ورودی به بستر جذب سطحی، به دلیل افزایش سرعت جریان هوا و کاهش زمان ماند کروم در بستر جذب، مقداری از کروم قبل از رسیدن به نقطه تعادل، بستر را ترک کرده و میزان جذب کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی در پژوهش‌های سایر محققان حاصل شده است (۳، ۱۳، ۱۴، ۱۸، ۲۰، ۳۳-۳۶). مقدار جاذب در ستون جذب تعیین کننده تعداد مکان‌های فعال جذب است. زمان رسیدن به نقطه شکست در بستر جذب سطحی کربن فعال، با ارتفاع ۲/۵، ۵ و ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب ۲۲/۵، ۴۵ و ۹۹ ساعت و زمان رسیدن به نقطه اشباع به ترتیب ۳۹، ۸۴ و ۱۵۴/۵ ساعت است (شکل ۵). با افزایش ارتفاع بستر جذب، اشباع بستر دیرتر اتفاق می‌افتد، دلیل این امر افزایش زمان ماند کروم در ستون جذب و زمان رسیدن به

۲۰، ۲۷، ۲۹، ۳۰). با افزایش غلظت کروم ورودی به بستر جذب، میزان حذف آلاینده کاهش می‌یابد اما ظرفیت جذب (q) و میزان خروجی از بستر افزایش می‌یابد زیرا انتقال جرم با افزایش گرادیان غلظت، سریع‌تر اتفاق می‌افتد به طوری که در سایر تحقیقات نیز چنین نتایجی به دست آمده است (۳، ۲۶، ۳۱، ۳۲). اثر میزان جریان هوا در کارایی جذب سطحی کروم شش ظرفیتی با غلظت ورودی ۱۰ میلی‌گرم بر متر مکعب و عمق بستر ۵ سانتی‌متر در شکل ۴ نشان داده شده است. طبق نتایج به دست آمده، در میزان جریان هوای بیشتر (۳ لیتر بر دقیقه) به دلیل افزایش سرعت جریان هوا و کاهش زمان ماند یون‌های کروم در بستر جذب، رسیدن به نقطه شکست (۴۵ ساعت) و اشباع (۸۴ ساعت) سریع‌تر اتفاق افتاده است، لذا راندمان حذف آلاینده کاهش می‌یابد. در جریان هوای ۱ لیتر بر دقیقه تا بیش از ۹۰ ساعت نمونه برداری انجام شد ولی منحنی به نقطه شکست نرسید. در جریان هوای



نقطه شکست است لذا با کاهش نسبت C (غلظت خروجی) به C<sub>0</sub> (غلظت ورودی) به دلیل افزایش سطح ویژه جاذب و سایت‌های جذب، ظرفیت جذب افزایش می‌یابد (۲۱، ۲۷، ۲۸، ۳۰).

در ارتفاع کم‌تر بستر جذب، پدیده پراکندگی در انتقال جرم ایجاد شده و بعد از نقطه شکست، غلظت خروجی افزایش یافته و ظرفیت جذب کاهش می‌یابد (۱۸، ۲۸، ۲۹). با افزایش ارتفاع بستر جذب و زمان مواجهه آلاینده با جاذب، شیب منحنی شکست کاهش می‌یابد (۱۷، ۲۷، ۳۷).

با افزایش غلظت آلاینده ورودی به بستر جذب، مقدار KYN و q<sub>0</sub> به دلیل افزایش نیروی پیش برنده انتقال جرم، افزایش می‌یابد و τ و KTh به دلیل افزایش سرعت اشباع بستر جذب، کاهش پیدا می‌کنند (جدول ۴). با افزایش ارتفاع بستر جذب، KYN و KTh کاهش، τ و q<sub>0</sub> افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی توسط سایر محققین به‌دست آمده است (۱۶، ۲۰، ۲۸، ۳۰). مطابق جدول ۴، اطلاعات مدل‌های یون-نلسون و توماس بر داده‌های حاصل از انجام آزمایشات کربن فعال با ضریب همبستگی بالای ۰/۹۹۵۳ منطبق است.

همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، راندمان جذب، میزان جرم جاذب مصرفی و ظرفیت ویژه جاذب با افزایش غلظت کروم ورودی به ستون جذب، کاهش می‌یابد ولی با افزایش ارتفاع بستر

جذب، راندمان جذب سطحی، نسبت جرمی کروم به کربن فعال و ظرفیت ویژه افزایش پیدا می‌کند. یکی از پارامترهای مهم در مقایسه کارایی جاذب، ظرفیت جذب (q) است. طبق آنچه در جدول ۴ نشان داده شده است، ظرفیت جذب با عمق بستر جذب و غلظت کروم در جریان ورودی رابطه مستقیم دارد.

### نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد ظرفیت جذب کربن فعال با افزایش عمق بستر جذب، افزایش یافته اما با افزایش میزان جریان هوا و غلظت ورودی، کاهش پیدا کرد. راندمان کربن فعال در جذب سطحی کروم شش ظرفیتی از جریان هوا، در میزان جریان ۳ لیتر بر دقیقه، عمق بستر ۵ سانتی‌متر و غلظت ۲۰ و ۲۰۰ برابر TLV به ترتیب یون-نلسون و توماس با ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۹۹۵۳، با داده‌های آزمایش‌گاهی مطابقت دارند.

### تشکر و قدردانی

از گروه مهندسی بهداشت محیط و حرفه‌ای دانشگاه تربیت مدرس که در تامین مکان و وسایل آزمایش‌گاهی مورد نیاز با نویسندگان همکاری نموده است، صمیمانه تشکر می‌شود.

## ≡ REFERENCES

1. Winder C, Stacey N. Occupational Toxicology. New York: CRC PRESS; 2005.
2. Casarett, doull's. toxicology. 7 ed. Klaassen CD, editor. United States: McGraw-Hill Companies; 2008.
3. Golbabaei F, Rahmanzadeh E, Moussavi Gh, Faghihi zarandi A. Fixed bed adsorption of hexavalent chromium onto natural zeolite from air stream. Journal of Health and Safety at Work. 2014;4(2):14. [Persian]
4. Hyder AHMG, Begum SA, Egiebor NO. Adsorption isotherm and kinetic studies of hexavalent chromium removal from aqueous solution onto bone char. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2015;3(2):1329-36.
5. Wang W, Li M, Zeng Q. Adsorption of chromium (VI) by strong alkaline anion exchange fiber in a fixed-bed column: Experiments and models fitting and evaluating. Separation and Purification Technology. 2015;149:16-23.
6. Schwarz AP, Bergmann CP, Fagan SB. Carbon nanotubes functionalized with titanium complexes for hexavalent chromium adsorption: An ab initio approach. Computational and Theoretical Chemistry. 2017;1113:110-9.
7. Kuo YW, Wang CS. Effect of rise distance on droplets generated from bubble bursting on the surface of chromic acid solutions. AIHA. 2002; 63:5-10.
8. Suh YJ, Chae JW, Jang HD, Cho K. Role of chemical hardness in the adsorption of hexavalent chromium species onto metal oxide nanoparticles. Chemical Engineering Journal. 2015;273:401-5.
9. Goldoni M, Caglieri A, Poli D, Vettori MV, Corradi M, Apostoli P, et al. Determination of hexavalent chromium in exhaled breath condensate and environmental air among chrome plating workers. Analytica Chimica Acta. 2006;562(2):229-35.
10. Tirgar A, Golbabaei F, Nourijelyani K. Evaluation of Parameters Influencing Hexavalent Chromium Mist Sampling: A Full Factorial Design. Iran J Chem Chem Eng. 2007;26(4):115-21.
11. DHHS. Criteria for a Recommended Standard. Occupational Exposure to Hexavalent Chromium CfD CaPCNI fOSaH. 2013.
12. Wilson A. Air pollution control of hexavalent chromium emissions. Metal Finishing. 1997;95(5):10-3.
13. Tirgar A, Golbabaei F, Hamed J, Nourijelyani K. Removal of airborne hexavalent chromium using alginate as a biosorbent. Environ Sci. 2011;8(2):237-44.
14. Leyva-Ramos R, Jacobo-Azuara A, Diaz-Flores PE, Guerrero-Coronado RM, Mendoza-Barron J, Berber-Mendoza MS. Adsorption of chromium(VI) from an aqueous solution on a surfactant-modified zeolite. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2008;330(1):35-41.
15. Gueye M, Richardson Y, Kafack FT, Blin J. High efficiency activated carbons from African biomass residues for the removal of chromium(VI) from wastewater. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2013.
16. Smaranda C, Popescu M-C, Bulgariu D, Măluțan T, Gavrilăscu M. Adsorption of organic pollutants onto a Romanian soil: Column dynamics and transport. Process Safety and Environmental Protection. 2017;108:108-20.
17. Ahmad AA, Hameed BH. Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated

- carbon prepared from waste. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;175(1-3):298-303.
18. Bhaumik M, Setshedi K, Maity A, Onyango MS. Chromium(VI) removal from water using fixed bed column of polypyrrole/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite. *Separation and Purification Technology*. 2013;110(0):11-9.
  19. Rojas-Mayorga CK, Bonilla-Petriciolet A, Sánchez-Ruiz FJ, Moreno-Pérez J, Reynel-Ávila HE, Aguayo-Villarreal IA, et al. Breakthrough curve modeling of liquid-phase adsorption of fluoride ions on aluminum-doped bone char using micro-columns: Effectiveness of data fitting approaches. *Journal of Molecular Liquids*. 2015;208:114-21.
  20. Kizito S, Wu S, Wandera SM, Guo L, Dong R. Evaluation of ammonium adsorption in biochar-fixed beds for treatment of anaerobically digested swine slurry: Experimental optimization and modeling. *Science of The Total Environment*. 2016;563-564:1095-104.
  21. Chen S, Yue Q, Gao B, Li Q, Xu X, Fu K. Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution by modified corn stalk: A fixed-bed column study. *Bioresource Technology*. 2012;113:114-20.
  22. Apha A. WPCF (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater. Public Health Association, Washington, DC. 2005.
  23. Moussavi G, Rashidi R, Khavanin A. The efficacy of GAC/MgO composite for destructive adsorption of benzene from waste air stream. *Chemical Engineering Journal*. 2013;228(0):741-7.
  24. Albadarin AB, Mangwandi C, Al-Muhtaseb AaH, Walker GM, Allen SJ, Ahmad MNM. Modelling and Fixed Bed Column Adsorption of Cr(VI) onto Orthophosphoric Acid-activated Lignin. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2012;20(3):469-77.
  25. Sugashini S, Begum KMMS. Performance of ozone treated rice husk carbon (OTRHC) for continuous adsorption of Cr (VI) ions from synthetic effluent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2013;1(1):79-85.
  26. Malkoc E, Nuhoglu Y, Dundar M. Adsorption of chromium(VI) on pomace—An olive oil industry waste: Batch and column studies. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;138(1):142-51.
  27. Baral SS, Das N, Ramulu TS, Sahoo SK, Das SN, Chaudhury GR. Removal of Cr(VI) by thermally activated weed *Salvinia cucullata* in a fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;161(2-3):1427-35.
  28. Ghasemi S, Ghorbani M, Ghazi MM. Synthesis and characterization of organic-inorganic core-shell structure nanocomposite and application for Zn ions removal from aqueous solution in a fixed-bed column. *Applied Surface Science*. 2015;359:602-8.
  29. Rao KS, Anand S, Venkateswarlu P. Modeling the kinetics of Cd(II) adsorption on *Syzygium cumini* L leaf powder in a fixed bed mini column. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2011;17(2):174-81.
  30. Sathvika T, Manasi, Rajesh V, Rajesh N. Adsorption of chromium supported with various column modelling studies through the synergistic influence of *Aspergillus* and cellulose. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016;4(3):3193-204.
  31. Chen N, Zhang Z, Feng C, Li M, Chen R, Sugiura N. Investigations on the batch and fixed-bed column performance of fluoride

- adsorption by Kanuma mud. Desalination. 2011;268(1-3):76-82.
32. Tamez Uddin M, Rukanuzzaman M, Maksudur Rahman Khan M, Akhtarul Islam M. Adsorption of methylene blue from aqueous solution by jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) leaf powder: A fixed-bed column study. *Journal of Environmental Management*. 2009;90(11):3443-50.
33. Agrawal P, Bajpai AK. Dynamic Column Adsorption Studies of Toxic Cr Ions onto Iron Oxide Loaded Gelatin Nanoparticles. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2011;32(9):1353-62.
34. Vinodhini V, Das N. Packed bed column studies on Cr removal from tannery wastewater by neem sawdust. *Desalination*. 2010;264(1-2):9-14.
35. Maji SK, Pal A, Pal T, Adak A. Modeling and fixed bed column adsorption of As(III) on laterite soil. *Separation and Purification Technology*. 2007;56(3):284-90.
36. Yan G, Viraraghavan T. Heavy metal removal in a biosorption column by immobilized *M. rouxii* biomass. *Bioresource Technology*. 2001;78(3):243-9.
37. Song J, Zou W, Bian Y, Su F, Han R. Adsorption characteristics of methylene blue by peanut husk in batch and column modes. *Desalination*. 2011;265(1-3):119-25.

## Investigation of activated carbon efficiency in hexavalent chromium adsorption from airflow

*Elham Rahmanzadeh<sup>1</sup>, Farideh Golbabaei<sup>2</sup>, Ali Faghihi Zarandi<sup>3</sup>, Seyed Gholamreza Moussavi<sup>4,\*</sup>, Mohammadreza Baneshi<sup>5</sup>*

<sup>1</sup> M.Sc., Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, North Khorasan University of Medical Sciences, Bojnurd, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran

<sup>4</sup> Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>5</sup> Associate Professor, Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran

### Abstract

**Introduction:** Hexavalent chromium (VI) is a very strong oxidizing agent that, despite its many uses in various industries, duration of the exposure can lead to lung cancer, deep wounds (in the hands, arm, tongue and palate), nasal septum perforation, burning and inflammation in the nose, lung and upper respiratory tract, asthma, contact dermatitis, damage to the kidneys and liver, and skin allergy. This study aimed to determine the activated carbon efficiency in chromium adsorption (VI) from air flow and its effective parameters.

**Material and Method:** In this experimental study, chromium mists were generated by a nebulizer (3A model, Italy). Performance of activated carbon in the Cr (VI) adsorption and its influencing factors such as air flow rate (1 and 3L/min), the initial Cr concentration (0.05, 0.15, 1 and 10 mg/m<sup>3</sup>) and bed depth (2.5, 5 and 10 cm) were investigated. Yoon-Nelson and Thomas models were used to predict performance of adsorbent column and correlation test was used to determine accordance between the model and actual data.

**Result:** Activated carbon adsorption capacity increased with increasing of bed depth but decreased with increasing of flow rate and inlet concentration. The results showed that the Yoon-Nelson and Thomas models with a correlation coefficient above 0.9953 matched with the experimental data.

**Conclusion:** The results indicated that activated carbon has a high efficiency in Cr (VI) adsorption, so that its efficiency at flow rate of 3 L/m, depth of 5 cm and concentration of 20 TLV and TLV was 85.42 and 71.83 percent respectively.

**Key words:** *Adsorption, Air Borne Chromium (VI), Activated Carbon, Yoon-Nelson Model, Thomas Model*

\* Corresponding Author Email: [moussavi@modares.ac.ir](mailto:moussavi@modares.ac.ir)