

حذف یون‌های محلول کروم شش ظرفیتی با استفاده از خاکستر و کربن چوب صنوبر به عنوان جاذب

امیرحسین سیاح‌زاده^۱، احمد بادکوبی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

badkoubi@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: مرداد ۱۳۸۱، پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۳)

چکیده از آنجا که مواد زاید بیولوژیکی، ارزان قیمت بوده و در طبیعت به فراوانی یافت می‌شود، جذب یون‌های محلول فلزهای سنگین توسط این مواد می‌تواند روشی مناسب و ارزان برای حذف فلزهای سنگین از پساب‌های صنعتی باشد. بر همین اساس در این تحقیق، خاکستر و کربن تهیه شده از چوب صنوبر، به عنوان جاذب یون‌های محلول کروم شش ظرفیتی بررسی و آزمایش شده است. در طی آزمایش‌های انجام شده، اثر pH محلول، غلظت اولیه کروم در محلول و غلظت جاذب در محلول، بر میزان جذب کروم بررسی شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که جذب یون‌های محلول کروم تا حد زیادی به pH نهایی محلول و غلظت اولیه کروم بستگی دارد. در شرایط بهینه - که غلظت اولیه کروم برابر ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر و pH اولیه محلول بر روی ۲ تنظیم شده بود - راندمان جذب کروم با استفاده از ۲/۵ گرم بر لیتر کربن چوب صنوبر در حدود ۳۷٪ به دست آمد. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که جذب یون محلول کروم توسط کربن‌های تهیه شده، به خوبی از مدل ایزوترم لانگ‌مایر تبعیت می‌کند.

کلید واژگان: جذب سطحی، کروم، چوب صنوبر، پساب‌های صنعتی.

۱- مقدمه

آنزیم‌های بدن مانند سم بوده و در مقادیر زیاد، به کبد و کلیه‌ها ضررهایی وارد می‌کند. همچنین ترکیبات غیرمحلول کروم در شش‌ها باقی مانده و به مرور زمان توسعه یافته و در ایجاد سرطان ریه نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند. از دیگر عوارض این فلز، آماس پوستی است که به علت تماس با کروم و ترکیبات کروم‌دار به وجود می‌آید [۱]. با توجه به آنچه گفته شد حذف کروم و به طور کلی حذف فلزهای سنگین از پساب‌های صنعتی، یک موضوع زیست‌محیطی بسیار مهم و در خور توجه است.

کروم^۱ بیشتر از طریق تخلیه پساب‌های صنعتی نظیر پساب صنایع آلیاژی، آبکاری فلزها، رنگرزی و نساجی، به محیط زیست وارد می‌شود. ترکیبات کروم محلول در آب، برای بافت‌های بدن انسان بی‌نهایت سوزش‌آور، خورنده و سمی بوده و قبل از اینکه در بدن وارد عمل شوند، به داخل بافت‌های سطحی نفوذ می‌کنند. کروم برای

۱ جهت رعایت اختصار و سادگی از این به بعد هرگاه در متن از کلمه کروم به تنهایی استفاده شود، کروم شش ظرفیتی مد نظر می‌باشد.

کربن تهیه شده از چوب صنوبر به عنوان جاذب یون‌های محلول کروم تحت آزمایش قرار گرفت. در طی آزمایش‌های انجام شده، اثر pH محلول، غلظت اولیه کروم در محلول و غلظت جاذب در محلول، بر میزان جذب کروم بررسی شد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مواد

۲-۱-۱- جاذب‌ها

جاذب‌های مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از خاکستر و کربن چوب صنوبر. برای تهیه خاکستر، تکه‌های چوب صنوبر در درون کوره گذاشته شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای 550°C قرار گرفت. خاکستر حاصل، پس از خنک شدن در ظروف در پوش‌دار شیشه‌ای نگهداری شد تا برای استفاده در آزمایش‌های جذب آماده باشد. برای تهیه کربن، تکه‌های چوب صنوبر در داخل یک سه راهی به صورت فشرده قرار داده و توسط در پوش، مسیر باز سه راهی بسته و سه راهی در داخل یک قوطی فلزی قرار داده شد. حجم باقی‌مانده قوطی فلزی توسط خاک به صورت فشرده پر شد. قوطی فلزی پس از اینکه به طور کامل از خاک پر شده بود، در داخل کوره قرار گرفت و به مدت یک ساعت تحت دمای 700°C قرار داده شد [۱۷]. پس از گذشت یک ساعت، قوطی فلزی از کوره بیرون آورده شد و برای خنک شدن در هوای آزاد قرار گرفت. پس از خنک شدن، قوطی تخلیه و سپس در پوش سه راهی باز شد. کربن حاصل پس از خرد شدن توسط هاون فلزی، با استفاده از الک‌های آزمایشگاهی مش 20^{μ} و مش 100^{μ} غربال شد تا اندازه قطر دانه‌های کربن در محدوده $0/85 - 0/15$ میلی‌متر باشد. در پایان کربن دانه‌ای به دست آمده، برای

برای حذف یا کاهش غلظت فلزهای سنگین، روشهای مختلفی وجود دارد. استفاده از میکروارگانیزم‌هایی مانند باکتری، قارچ و جلبک در تصفیه پساب‌های حاوی فلزهای سنگین، هرچند که امروزه روشی جذاب است، اما هنوز برای کاربردهای در مقیاس وسیع مناسب نیست. روشهای رایج و متداول نیز یا ناتوان و ناکارآمد هستند مانند فرایندهای احیای شیمیایی و ترسیب توسط آب آهک یا بسیار گران‌قیمت و هزینه‌بر هستند مانند فرایندهای تبادل یونی، حذف الکترولیتی و جذب سطحی توسط کربن فعال [۲].

در سالهای اخیر یکی از بهترین روشهای موجود برای حذف این یون‌های فلزی، فرایند جذب توسط مواد زاید بیولوژیکی و غیربیولوژیکی است. این مواد ارزان‌قیمت بوده و در طبیعت به فراوانی یافت می‌شوند. به همین دلیل در طی دهه گذشته، محققان، بسیاری از جاذب‌های ارزان‌قیمت و متنوع را به جای کربن فعال تجاری برای حذف فلزهای سنگین بررسی کرده‌اند [۳-۱۳]. همچنین در طی تحقیقات متعدد، از خاکستر برای حذف فلزهای سنگین از آب یا پساب استفاده شده که نتایج حاصل، نشان دهنده درصد‌های جذب قابل توجهی برای خاکستر بوده است [۴، ۱۳-۱۶]. در این میان محدوده وسیعی از کربن‌های فعال نیز به عنوان جاذب مورد استفاده قرار گرفته است. به طوری که در سالهای اخیر تحقیقات گسترده‌ای بر روی کربن‌های فعال بقایای زاید محصولات کشاورزی و گونه‌های گیاهی انجام شده است [۲، ۵، ۱۰، ۲۰-۲۱]. برای جذب یون محلول کروم نیز در طی تحقیقات مختلف، جاذب‌های متنوعی بررسی و آزمایش شده که نتایج برخی از این تحقیقات در جدول ۱ آورده شده است.

بر اساس آنچه گفته شد در این تحقیق، خاکستر و

حذف یون های محلول کروم شش ظرفیتی با استفاده از خاکستر...

جدول ۱ جذب کروم توسط جاذب‌های مختلف

منبع	درصد جذب	غلظت جاذب (gr/L)	جاذب	غلظت جذب‌شونده (mg/L)	جذب‌شونده
[۲]	۸۰	۴	کربن فعال پوسته فندق	۱۰۰	کروم شش‌ظرفیتی
[۳]	۵۵	۱	رزین تبادل یونی	۱۰۰	کروم شش‌ظرفیتی
[۳]	۳۵	۱	پوست خرچنگ	۱۰۰	کروم شش‌ظرفیتی
[۲]	۱۰	۱	زنولیت	۱۰۰	کروم شش‌ظرفیتی
[۳]	۵	۱	کربن فعال دانه‌ای	۱۰۰	کروم شش‌ظرفیتی
[۳]	۲	۱	کربن فعال پودری پوسته نارگیل	۱۰۰	کروم شش‌ظرفیتی
[۶]	۳۳	۱۰	کیانیت	۵۰	کروم شش‌ظرفیتی
[۲۲]	۶۴/۸	۵۰	خاکستر	۱۰۰	کروم شش‌ظرفیتی

پانریاک^۱ ۶۹٪ بود، ۷۲/۵ میلی‌لیتر از اسید مذکور توسط آب دو بار تقطیر شده به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد و بدین ترتیب درجه خلوص اسید نیتریک به ۵۰٪ رسید.

۲-۱-۴- محلول‌های هضم، کاتالیست و استاندارد برای اندازه‌گیری اکسیژن مورد نیاز شیمیایی^۲
برای اندازه‌گیری اکسیژن مورد نیاز شیمیایی به روش آمپول، محلول‌های هضم، کاتالیست و استاندارد مطابق دستورالعمل [۲۳] آماده شد.

۲-۲- روش

تمامی آزمایشات جذب به صورت ناپیوسته^۱ و در بشرهای شیشه‌ای یک لیتری تحت دمای ۲۰°C انجام شد. اندازه‌گیری وزن مواد و جاذب‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتالی انجام شد. تمامی محلول‌های مورد آزمایش با هر غلظت مورد نظر، از محلول استوک ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کروم تهیه می‌شد و حجم هر یک از آنها ۲۰۰ میلی‌لیتر بود. pH محلول‌ها توسط اسید نیتریک تنظیم

استفاده در آزمایشهای جذب در ظروف شیشه‌ای در پوش‌دار نگهداری شد. جالب توجه است که بدانید خاکستر و کربن تهیه شده از چوب صنوبر، به ترتیب ۰/۷۶ و ۲۵ درصد وزنی چوب صنوبر اولیه را تشکیل می‌دهند. یعنی مقدار چوب صنوبر مورد نیاز برای تهیه جرم معینی خاکستر، ۳۲/۹ برابر مقدار چوب صنوبر مورد نیاز برای تهیه همان جرم معین، کربن است.

۲-۱-۲- پساب مصنوعی

پساب مصنوعی حاوی کروم، از حل کردن دی کرومات پتاسیم آزمایشگاهی در آب دو بار تقطیر شده به دست آمد. بدین صورت که برای تهیه محلول استوک^۱ ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کروم، ۷/۰۷۲ گرم دی‌کرومات پتاسیم در آب دو بار تقطیر شده حل شد و سپس حجم محلول توسط آب دو بار تقطیر شده به ۲۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. از محلول استوک مذکور برای تهیه پساب مصنوعی حاوی کروم با هر غلظت مورد نیاز، استفاده شد.

۲-۱-۳- اسید نیتریک ۵۰٪

از آنجا که درجه خلوص اسید نیتریک آزمایشگاهی

2. Panreac
3. C.O.D
4. Batch

1. Stock

نهایی محلول بستگی دارد. در نمودار ۱ ملاحظه می‌شود هنگام استفاده از خاکستر چوب صنوبر به عنوان جاذب، pH نهایی محلول در محدوده ۱۱/۵ تا ۱۳ قرار می‌گیرد و میزان جذب کروم بسیار کم و ناچیز است. اما هنگام استفاده از کربن چوب صنوبر به عنوان جاذب (نمودار ۲)، pH نهایی محلول با افزایش به نسبت کمتری، در محدوده ۱/۵ تا ۷ قرار می‌گیرد و در این حالتها میزان جذب کروم افزایش می‌یابد. با دقت بیشتر در نمودار ۲ مشخص می‌شود که بیشترین میزان جذب کروم مربوط به زمانی است که pH نهایی محلول در حدود ۲/۲ تا ۲/۴ باشد و این هنگامی است که pH اولیه محلول در حدود ۲ تنظیم شده است.

۳-۲- اثر pH محلول پس از افزودن خاکستر، بر میزان جذب کروم

نتایج به‌دست آمده از این آزمایش در نمودار ۳ نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از افزایش قابل توجه میزان حذف کروم توسط خاکستر در pH های پایین می‌باشد که این موضوع مؤید همان نتیجه‌ای است که در مرحله قبل بدست آمد. بنابراین به طور قطع می‌توان گفت که میزان جذب کروم محلول، وابستگی زیادی به pH نهایی محلول دارد. با کمی دقت در نمودار ۳ مشخص می‌شود که بیشترین میزان جذب کروم مربوط به زمانی است که pH نهایی محلول در حدود ۴/۷ باشد. در صورتی که pH نهایی برای جاذب کربن در حدود ۲/۳ به‌دست آمد. بنابراین pH نهایی بهینه برای همه جاذب‌ها، محدوده کاملاً یکسانی نیست.

در هر مرحله پس از تنظیم pH محلولها و افزودن جاذب به آنها، لازم بود که محلولها در شرایط یکسان به هم زده شوند؛ برای این منظور از دستگاه جارتست^۱ استفاده می‌شد و بشرها به مدت ۲ ساعت در دستگاه جارتست، با سرعت ۱۲۰ دور بر دقیقه پره‌ها قرار داده می‌شد. سپس بشرها از دستگاه جارتست بیرون آورده و به مدت ۳۰ دقیقه به طور ثابت نگهداشته می‌شد تا ذرات جاذب معلق در محلول به خوبی ته‌نشین شود. پس از ته‌نشین شدن ذرات معلق، باید غلظت نهایی کروم در هر محلول مشخص می‌شد. به این دلیل باید از هر بشر، نمونه‌ای با حجم حدوداً ۲۰ میلی‌لیتر برای آنالیز جذب اتمی آماده و ارسال می‌شد. برای این منظور از هر بشر حدود ۳۰ میلی‌لیتر از سطوح بالای محلول برداشته و توسط کاغذ صافی معمولی صاف شد. سپس محلول صاف شده به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه سانتریفوژ با سرعت ۶۰۰۰ دور بر دقیقه قرار داده شد تا هر گونه ذرات معلق باقیمانده آن، ته‌نشین شود. محلول سانتریفوژ شده در ظروف پلاستیکی ۶۰ میلی‌لیتری ریخته و pH آن توسط اسید نیتریک ۵۰٪ به زیر ۲ برده شد [۲۴] سپس غلظت نهایی کروم در محلول توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. در انتهای این بخش مراحل مختلف آزمایشهای انجام شده در این تحقیق، در جدول ۲ نشان داده می‌شود.

۳- نتایج و بحث

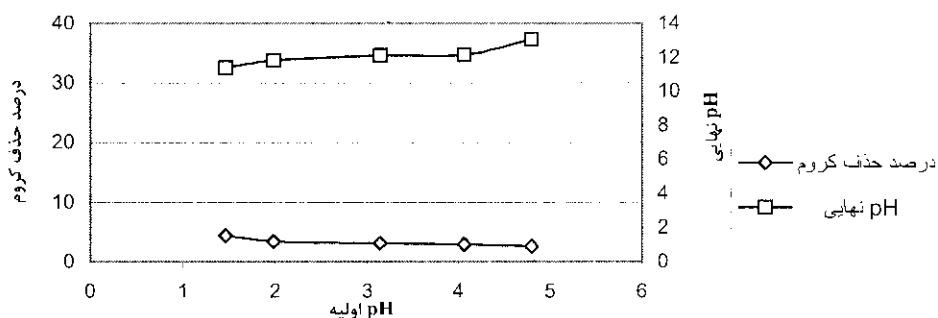
۳-۱- اثر pH اولیه محلول بر میزان جذب کروم

نتایج حاصل از این مرحله در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای ۱ و ۲ به‌روشنی می‌توان دریافت که جذب کروم از محلول به طور عمده به pH

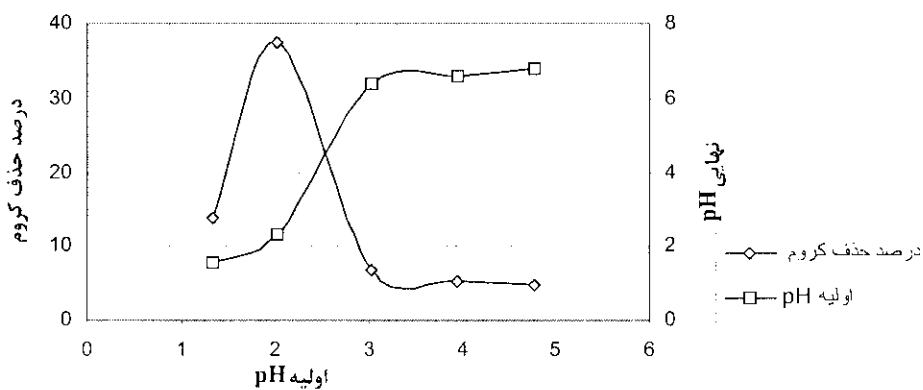
1. Jar Test

جدول ۲ مراحل مختلف آزمایشات انجام شده

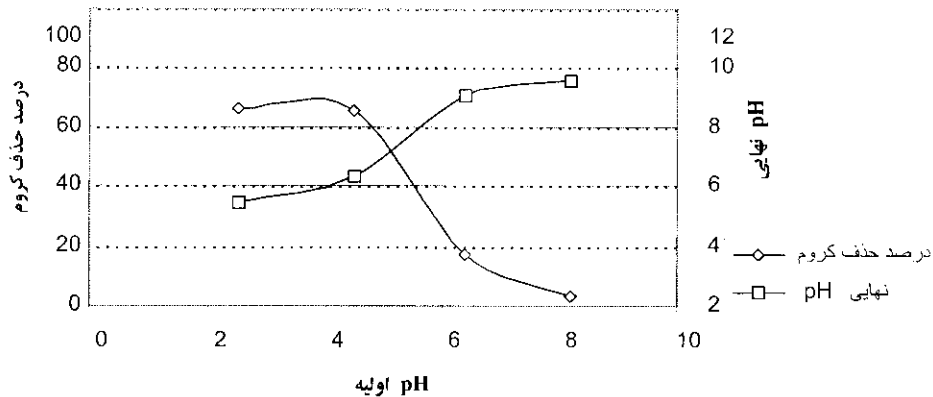
مرحله	عوامل مورد بررسی	جاذب به کار رفته	توضیح
۱	pH اولیه محلول	خاکستر و کربن	۱- تهیه پنج محلول با غلظت ۱۰ mg/L کروم ۰۲ تنظیم pH محلولها بر روی ۴، ۳، ۲، ۱، ۰، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ به هم زدن، ته نشینی، نمونه برداری و آنالیز جذب اتمی محلولها (۲۵ g/L خاکستر ۲/۵ کربن)
۲	pH محلول پس از افزودن خاکستر	خاکستر	۱- تهیه پنج محلول با غلظت ۱۰ mg/L کروم ۰۲ افزودن جاذب به محلولها به مقدار ۲۵ g/L ۰۳ تنظیم pH محلولها بر روی ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ به هم زدن، ته نشینی، نمونه برداری و آنالیز جذب اتمی
۳	غلظت اولیه کروم	کربن	۱- تهیه چهار محلول با غلظتهای ۱۰، ۵، ۱۰، ۱۵۰ mg/L کروم ۰۲ تنظیم pH محلولها بر روی ۲ ۰۳ افزودن جاذب به محلولها به مقدار ۵ g/L ۰۴ به هم زدن، ته نشینی، نمونه برداری و آنالیز جذب اتمی
۴	غلظت کربن	کربن	۱- تهیه شش محلول با غلظت ۱۰ mg/L کروم ۰۲ تنظیم pH محلولها بر روی ۲ ۰۳ افزودن جاذب به محلولها به مقدار ۱/۵، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ g/L ۰۴ به هم زدن، ته نشینی، نمونه برداری و آنالیز جذب اتمی
۵	غلظت کربن در پساب واقعی	کربن	۱- جداسازی چهار محلول از پساب واقعی با غلظت ۱۳۳ mg/L کروم ۰۲ تنظیم pH محلولها بر روی ۲ ۰۳ افزودن جاذب به محلولها به مقدار ۲/۵، ۵، ۱۰، ۲۵ g/L ۰۴ به هم زدن، ته نشینی، نمونه برداری و آنالیز جذب اتمی
۶	غلظت اولیه کروم	کربن فعال آزمایشگاهی	۱- تهیه چهار محلول با غلظتهای ۱۰، ۵، ۱۰، ۱۵۰ mg/L کروم ۰۲ تنظیم pH محلولها بر روی ۲ ۰۳ افزودن جاذب به محلولها به مقدار ۵ g/L ۰۴ به هم زدن، ته نشینی، نمونه برداری و آنالیز جذب اتمی



نمودار ۱ اثر pH محلول بر میزان حذف کروم توسط خاکستر چوب صنوبر (غلظت اولیه کروم ۱۰ (mg/L) و غلظت خاکستر ۲۵ (g/L) و دما ۲۰ °C).



نمودار ۲ اثر pH محلول بر میزان حذف کروم توسط کربن چوب صنوبر



نمودار ۳ اثر pH محلول پس از افزودن خاکستر چوب صنوبر، بر میزان حذف کروم (غلظت اولیه کروم ۱۰ mg/L و غلظت خاکستر ۲۵ g/L و دما ۲۰ °C).

استفاده در محلول، ۱۰ برابر غلظت کربن مورد استفاده در محلول است. بنابراین کاملاً واضح است که در ادامه این تحقیق باید از بررسی بیشتر بر روی خاکستر صرف نظر کرد.

۳-۳- اثر غلظت اولیه کروم در محلول، بر میزان جذب آن توسط کربن

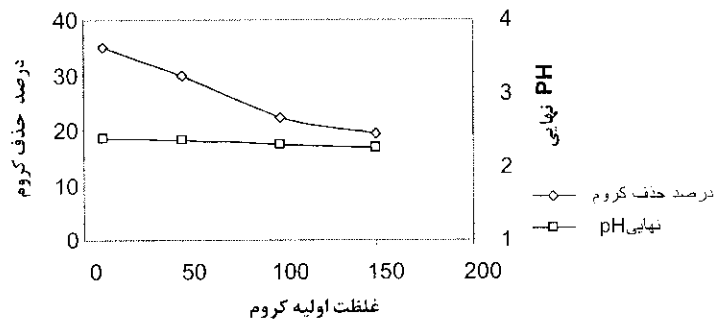
نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۳ و نمودار ۴ نشان داده شده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۳ و نمودار ۴ حاکی از آن است که با افزایش غلظت یون محلول کروم، راندمان جذب یون مذکور توسط کربن کاهش یافته و در عوض مقدار کروم جذب شده در واحد جرم کربن افزایش می‌یابد.

نکته دیگر اینکه از آنجا که افزودن خاکستر به محلول، افزایش pH محلول و قلیایی شدن آن را در پی دارد، کاهش pH محلول پس از افزودن خاکستر، نیازمند استفاده از مقادیر بسیار زیادی اسید نیتریک غلیظ (۶۹٪) است به طوری که برای هر نمونه ۲۰۰ میلی‌لیتری - بسته به مقدار نهایی pH - بین ۱ تا ۷ میلی‌لیتر اسید مصرف می‌شود و این در حالی است که برای تنظیم pH اولیه محلول قبل از افزودن جاذب، از اسید نیتریک رقیق‌تر و به مقدار بسیار کمتری استفاده می‌شود، یعنی در حد ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی‌لیتر اسید رقیق به ازای ۲۰۰ میلی‌لیتر نمونه. از سوی دیگر در قسمت ۳-۱-۱ ملاحظه شد که برای تهیه مقدار معینی خاکستر، چوب صنوبر مورد نیاز در حدود ۳۲/۹ برابر چوب صنوبر مورد نیاز برای تهیه همان مقدار معین، کربن است و این در حالی است که غلظت خاکستر مورد

جدول ۳ اثر غلظت اولیه کروم بر میزان جذب آن توسط کربن چوب صنوبر (pH اولیه برابر ۲ و غلظت کربن ۵ (g/L) و دما ۲۰ °C).

ردیف	غلظت اولیه کروم (mg/L)	pH نهایی محلول	غلظت نهایی کروم (mg/L)	درصد حذف کروم	مقدار کروم جذب شده در واحد جرم جاذب (mg/g)
۱	۱۰	۲/۳۹	۶/۴۹	۳۵/۱	۰/۷۰۲
۲	۵۰	۲/۳۶	۳۵	۳۰	۳
۳	۱۰۰	۲/۳۱	۷۷/۷	۲۲/۳	۲/۴۶
۴	۱۵۰	۲/۲۶	۱۲۱	۱۹/۳	۵/۸



نمودار ۴ اثر غلظت اولیه کروم بر میزان جذب آن توسط کربن چوب صنوبر (pH اولیه برابر ۲ و غلظت کربن ۵ g/L و دما ۲۰ °C).

جاذب از مقدار مذکور، نه فقط میزان حذف کروم افزایش نمی‌یابد، بلکه کاهش نیز خواهد داشت. این در حالی است که در مطالعات و بررسی‌های مشابه بر روی جذب یون‌های محلول فلزهای سنگین توسط جاذب‌های مختلف، معمولاً با افزایش غلظت جاذب در محلول، میزان جذب یون‌های محلول افزایش می‌یابد.

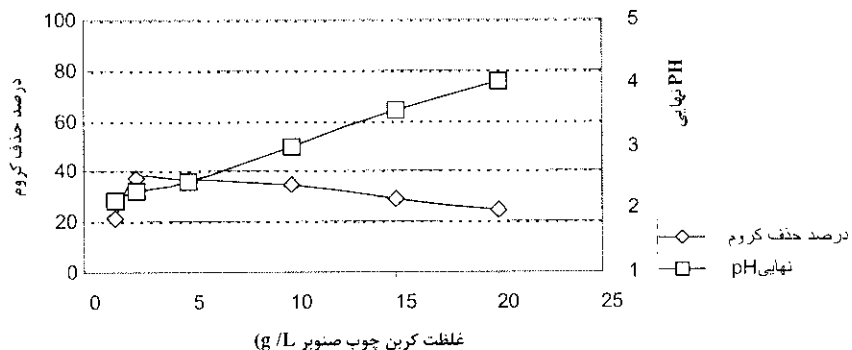
۳-۴- اثر غلظت کربن بر میزان جذب کروم

نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۴ و نمودار ۵ نشان داده شده است.

نتایج بدست آمده حاکی از آن است که برای داشتن بیشترین درصد حذف کروم، باید از غلظت ۲/۵ گرم بر لیتر جاذب استفاده شود و در صورت افزایش غلظت

جدول ۴ اثر غلظت کربن چوب صنوبر بر میزان جذب کروم (pH اولیه برابر ۲ و غلظت اولیه کروم ۱۰ mg/L و دما ۲۰ °C).

ردیف	غلظت کربن (g/L)	pH نهایی محلول	غلظت نهایی کروم (mg/L)	درصد حذف کروم	مقدار کروم جذب شده در واحد جرم جاذب (mg/g)
۱	۱/۵	۲/۱۳	۷/۸۷	۲۱/۳	۱/۴۲
۲	۲/۵	۲/۲۹	۶/۲۶	۳۷/۴	۱/۵
۳	۵	۲/۴۳	۶/۳۴	۳۶/۶	۰/۷۳
۴	۱۰	۲/۹۸	۶/۵۱	۳۴/۹	۰/۳۵
۵	۱۵	۳/۵۷	۷/۰۹	۲۹/۱	۰/۱۹
۶	۲۰	۴/۰۲	۷/۵۴	۲۴/۶	۰/۱۲



نمودار ۵ اثر غلظت کربن چوب صنوبر بر میزان جذب کروم (pH اولیه برابر ۲ و غلظت اولیه کروم ۱۰ mg/L و دما ۲۰ °C).

مذکور بیشتر شود، موجب کاهش میزان جذب خواهد این مقدار بهینه برای کربن مورد استفاده در این تحقیق ۲/۵ گرم برلیتر است.

۳-۵- تعیین غلظت مناسب کربن برای جذب کروم از پساب واقعی

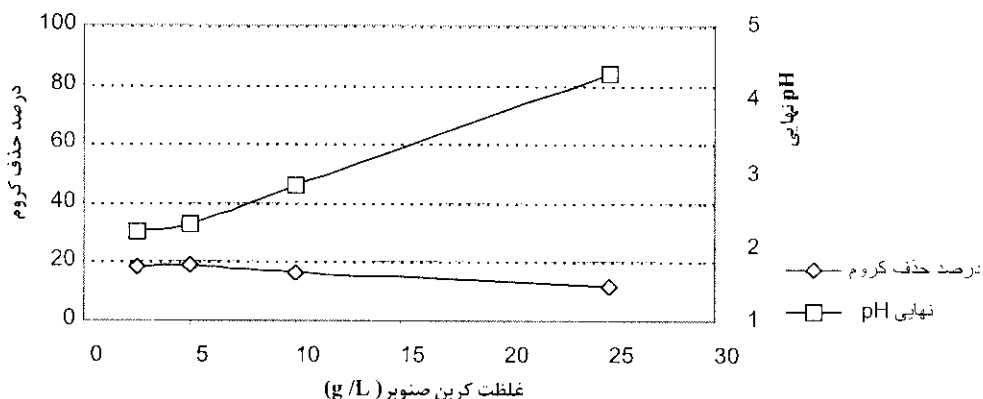
در این مرحله، آزمایش جذب با غلظت‌های متفاوتی از کربن بر روی پساب تهیه شده از یک کارگاه آبکاری فلز انجام شد. pH پساب تهیه شده در حدود ۶/۳ و این پساب دارای یونهای محلول کروم شش ظرفیتی، نیکل و مس با غلظتهایی به ترتیب در حدود ۱۳۳، ۱۷/۹، ۵/۶ میلی‌گرم برلیتر بود. اکسیژن مورد نیاز شیمیایی پساب نیز در حدود ۳۳۳ میلی‌گرم برلیتر به دست آمد.

نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۵ و نمودار ۶ نشان داده شده است.

در توجیه نتایج به دست آمده می‌توان به دو موضوع اشاره کرد. اول اینکه در حین انجام آزمایشهای این مرحله مشاهده شد که هر چه غلظت جاذب در محلول بیشتر شود، ذرات جاذب بیشتری به یکدیگر می‌چسبند و توده‌های بیشتر و بزرگتری را تشکیل می‌دهند. در نتیجه سطح تماس جاذب با جذب شونده کم شده و میزان جذب کاهش می‌یابد. دوم اینکه با توجه به جدول ۴ دیده می‌شود که با افزایش غلظت جاذب در محلول، pH نهایی محلول افزایش می‌یابد. به طوری که اگر غلظت جاذب از محدوده ۲/۵ تا ۵ گرم بر لیتر فراتر رود، pH نهایی محلول افزایش یافته و از محدوده بهینه ۲/۲ تا ۲/۴ خارج می‌شود. بنابراین در بررسی علت کاهش درصد حذف کروم در این مرحله، pH نهایی محلول را نیز نباید نادیده گرفت. در مجموع به نظر می‌رسد که همواره با افزایش غلظت جاذب در محلول تا یک مقدار بهینه، میزان جذب افزایش می‌یابد. اما اگر غلظت جاذب از مقدار بهینه.

جدول ۵ اثر غلظت کربن چوب صنوبر بر میزان جذب کروم از پساب واقعی (pH اولیه برابر ۲ و غلظت کروم ۱۳۳ mg/L و دما ۲۰°C).

ردیف	غلظت کربن (g/L)	pH نهایی محلول	غلظت نهایی کروم (mg/L)	درصد حذف کروم
۱	۲/۵	۲/۲۰	۱۰۹	۱۸
۲	۵	۲/۳۲	۱۰۸	۱۸/۸
۳	۱۰	۲/۸۳	۱۱۱	۱۶/۵
۴	۲۵	۴/۳۵	۱۱۷	۱۲



نمودار ۶ اثر غلظت کربن چوب صنوبر بر میزان جذب کروم از پساب واقعی (pH اولیه برابر ۲ و غلظت کروم ۱۳۳ mg/L و دما ۲۰°C).

یون محلول کروم و غلظت کربن، مشاهده می شود که میزان جذب کروم از پساب واقعی قدری کمتر از میزان جذب کروم از پساب مصنوعی است که این موضوع به احتمال زیاد ناشی از وجود برخی ناخالصی های دیگر در پساب واقعی است.

همچنین در این آزمایش حذف همزمان نیکل و مس و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی - در شرایطی که غلظت کربن ۲/۵ گرم بر لیتر باشد - بررسی شد که نتایج حاصل نشان دهنده ۶/۱٪ حذف نیکل، ۲۶/۸٪ حذف مس و ۳۳/۶٪ حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی است. یعنی در شرایط بهینه برای جذب یون محلول کروم، میزان حذف نیکل، مس و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی از محلول چندان قابل توجه نیست.

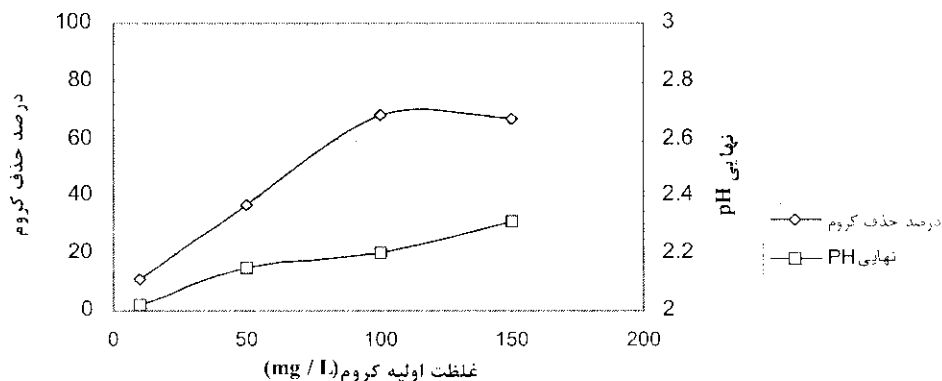
با توجه به نتایج به دست آمده سه نکته به نظر می رسد: اول اینکه درصدهای جذب کروم در این مرحله از آزمایشها، پایین بوده و حداکثر به ۲۵٪ رسیده است که این موضوع به مقدار غلظت اولیه کروم در محلول باز می گردد: به طوری که با مقایسه جدول ۶ با جدول ۴ این موضوع به خوبی روشن می شود.

دوم اینکه بیشترین راندمان جذب کروم توسط کربن، در غلظت ۵ گرم بر لیتر بدست آمده است و با افزایش غلظت کربن از این مقدار، راندمان جذب کروم به جای افزایش، کاهش یافته است. این موضوع همانطور که در بخش ۳-۴ توضیح داده شد، به چسبیدن ذرات جاذب به یکدیگر و کاهش سطح تماس جاذب با جذب شونده و نیز افزایش pH نهایی محلول بر می گردد.

سوم اینکه با مقایسه درصدهای جذب به دست آمده از پساب واقعی با درصدهای جذب به دست آمده از پساب مصنوعی در شرایط یکسان از نظر pH و غلظت اولیه

جدول ۶ جذب کروم توسط کربن فعال آزمایشگاهی (pH اولیه برابر ۲ و غلظت کربن ۵ g/L و دما ۲۰ °C)

ردیف	غلظت اولیه کروم (mg/L)	pH نهایی محلول	غلظت نهایی کروم (mg/L)	درصد حذف کروم	مقدار کروم جذب شده در واحد جرم جاذب (mg/g)
۱	۱۰	۲/۰۲	۸/۹۲	۱۰/۸	۰/۲۱۶
۲	۵۰	۲/۱۵	۳۱/۴	۳۷/۲	۳/۷۲
۳	۱۰۰	۲/۲۰	۳۲/۱	۶۷/۹	۱۳/۵۸
۴	۱۵۰	۲/۳۱	۵۰/۱	۶۶/۶	۱۹/۹۸



نمودار ۷ جذب کروم توسط کربن فعال آزمایشگاهی (pH اولیه برابر ۲ و غلظت کربن ۵ g/L و دما ۲۰ °C)

ولانگ‌مایر بررسی و مقادیر هر یک از پارامترهای ایزوترم‌های مذکور برای هر حالت به دست آورده شده است که در طی جدول ۷ نشان داده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

۱- جذب سطحی یون‌های محلول کروم به میزان قابل توجهی به pH نهایی محلول بستگی دارد. به طوری که اگر pH نهایی محلول بین ۲/۲ تا ۲/۴ باشد، بیشترین میزان جذب کروم را توسط کربن چوب صنوبر خواهیم داشت؛ در حالی که بیشترین میزان جذب کروم توسط خاکستر چوب صنوبر در زمانی است که pH نهایی محلول حدود ۵/۵ باشد.

۲- از آنجا که افزودن خاکستر چوب صنوبر به پساب موجب افزایش بسیار زیاد pH پساب می‌شود، استفاده از آن برای جذب یون محلول کروم به علت تنظیم pH محلول به اسید فراوان نیاز دارد.

۳- برای کربن چوب صنوبر، راندمان جذب یون محلول کروم با غلظت اولیه آن در محلول، نسبت عکس دارد. یعنی هر قدر غلظت اولیه یون کروم در محلول کمتر باشد، راندمان جذب آن توسط کربن چوب صنوبر بیشتر خواهد بود. البته از سوی دیگر با افزایش غلظت اولیه یون کروم در محلول، مقدار کروم جذب شده در واحد جرم کربن چوب صنوبر افزایش می‌یابد.

۳-۶- جذب کروم توسط کربن فعال آزمایشگاهی

در این مرحله از کربن فعال دانه‌ای آزمایشگاهی مرکب به عنوان جاذب در جذب یون محلول کروم استفاده شد تا قابلیت جذب یون محلول کروم کربن فعال مذکور را با قابلیت جذب یون محلول کروم کربن چوب صنوبر بتوان مقایسه کرد. این آزمایش مشابه آزمایش قسمت ۳-۳ و در همان شرایط انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۶ و نمودار ۷ نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده از این آزمایش نشان می‌دهد که با افزایش غلظت اولیه کروم، درصد جذب آن به جای کاهش، افزایش قابل توجهی داشته و این با نتیجه‌ای که در بخش ۳-۳ بدست آمد همخوانی ندارد. اکنون اگر به تغییرات pH نهایی محلول توجه شود، مشخص می‌شود که بیشترین میزان جذب کروم مربوط به زمانی است که pH نهایی محلول در حدود ۲/۲ باشد و این همان نتیجه‌ای است که در بخش‌های ۱-۳ و ۳-۴ نیز بدست آمده است.

۳-۷- مدل‌های ایزوترم فرندلیچ و لانگ‌مایر برای آزمایش‌های انجام شده

در این قسمت، میزان تطابق نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده با مدل‌های ایزوترم جذب سطحی فرندلیچ

جدول ۷ مشخصات مدل‌های ایزوترم جذب سطحی برای جذب کروم در دمای ۲۰°C

ایزوترم لانگ‌مایر			ایزوترم فرندلیچ			نوع پساب	جاذب
R ²	b	a	R ²	n	K _f		
۰/۹۸۶	۰/۰۱۹۶۹	۰/۰۰۶۲۴	۰/۸۲۹۵	۱/۷۶۳۶۷	۰/۰۰۰۲۹	کربن چوب صنوبر	مصنوعی
۰/۹۶۱۸	-۰/۰۰۹۶۶	۰/۰۰۰۵۱۸	۰/۸۵۹	-۰/۰۳۲۸۹	۴/۵۶×۱۰ ^{۵۹}	کربن چوب صنوبر	واقعی
۰/۹۸۶۵	-۰/۰۲۴۵۲	-۰/۰۰۰۷۷۹	۰/۸۸۹۹	۰/۴۱۷۴۵	۰/۰۰۰۰۱۳	کربن فعال آزمایشگاهی	مصنوعی

- Vol. 35;No.15;pp. 3551-3556.
- [4] Mohan, Dines; Gupta, V.K.; Srivastava, S.K.; Chander, S; "Kinetics of Mercury Absorption from Wastewater Using Activated Carbon Derived from Fertilizer Waste;" *Colloids and Surface*; Vol. 177; 2001; pp. 169-181.
- [5] Kadirvelu, K.; Thamaraiselvi, K.; Namasivayam, C.; "Absorption of Nickel(II) from Aqueous Solution Onto Activated Carbon Prepared from Coirpith;" *Separation and Purification Technology*; Vol. 24; No.3; 2001; pp. 497-505.
- [6] Ajmal, Mohammad; Rao, Rifaqat A.K.; Ahmad, Rais; Ahmad, Jameel; Rao, Liaqat A.K.; "Removal and Recovery of Heavy Metals from Electroplating Wastewater by Using Kyanite as an Adsorbent;" *Journal of Hazardous Materials*; Vol. 87;No.1-3; 2001; pp. 127-137.
- [7] Banat, Fawzi; Al-Asheh, Sameer; Mohai, Fadhel; "Batch Zinc Removal from Aqueous Solution using Dried Animal Bones;" *Separation and Purification Technology*; Vol. 21; No.1-2; 2000; pp. 155-164.
- [8] Cheung, C.W.; Porter, J.F.; Mckay, G.; "Sorption Kinetic Analysis for the Removal of Cadmium Ions from Effluents Using Bone Char;" *Water Research*; Vol. 35; No.3; 2001;pp. 605-612.
- [9] Yu, Bin; Zhang, Y.; Shukla, Alka; Shukla, Shyam S.; Dorris, Kenneth L.; "The Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions by Sawdust Absorption Removal of Lead and Comparison of its Absorption with Copper;" *Journal of Hazardous Materials*; Vol. B 84; No.1; 2001; pp. 83-94.
- [10] Vaughan, Trivette; Seo, Chung W.; Marshall, Wayne E.; "Removal of

۴- بهترین غلظت کربن برای بیشترین راندمان جذب در حدود ۲/۵ گرم بر لیتر است. با این غلظت، در شرایطی که pH اولیه محلول بر روی ۲ تنظیم شود و غلظت اولیه یون محلول کروم نیز ۱۰ میلی گرم بر لیتر باشد، راندمان جذب کروم در حدود ۳۷٪ خواهد بود.

۵- در شرایط یکسان از نظر pH و غلظت اولیه یون محلول کروم، درصدهای جذب کروم از پساب واقعی در مقایسه با درصدهای جذب کروم از پساب مصنوعی مقداری کمتر است که این موضوع به احتمال زیاد ناشی از وجود برخی ناخالصی های دیگر در پساب واقعی است.

۶- نتایج به دست آمده نشان می دهد که جذب یون محلول کروم توسط کربن چوب صنوبر و کربن فعال آزمایشگاهی، از مدل ایزوترم لانگمایر به خوبی تبعیت می کند.

۵- فهرست واژگان

Activated Carbon	کربن فعال
Absorption	جذب سطحی
Batch	نایبسته
Correlation Coefficient	ضریب همبستگی
Jar Test	جار تست
Kyanite	کیانیت
Mesh	مش
Stock	استوک

۶- فهرست منابع

- [۱] افتخاریان؛ محمدعلی؛ بازیابی فلزهای سنگین از فاضلابهای صنعتی؛ سمینار کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ۱۳۷۴.
- [2] Cimino, Giuseppe; Passerini, Amedeo; Toscano, Giovanni; "Removal of Toxic Cations and Cr(VI) from Aqueous Solution by Hazelnut Shell;" *Water Research*; Vol.34; No.11; 2000 ; pp. 2955-2962.
- [3] An, H.K.; Park, B.Y.; Kim, D.S.; "Crab Shell for the Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution;" *Water Research*;

- 2001; pp.233-235.
- [18] Kim, Jin Wha; Sohn, Myoung-Hoi; Kim, Dong-Su; Sohn, Seung-Man; Kwon, Young-Shik; "Production of Granular Activated Carbon from Waste Walnut Shell and its Absorption Characteristics for Cu^{2+} Ion;" *Journal of Hazardous Materials*; Vol. B 85; No.3; 2001; pp.301-315.
- [19] Dastgheib, Seyed A.; Rockstraw, David A.; "Pecan Shell Activated Carbon: Synthesis, Characterization, and Application for the Removal of Copper from Aqueous Solution;" *Carbon*; Vol. 39; No.12; 2001; pp.1849 – 1855.
- [20] El-Hendawy, Abdel-Naser A.; Samra, S.E.; Girgis, B.S.; "Absorption Characteristics of Activated Carbons Obtained from Corncobs;" *Colloids and Surfaces*; Vol.180; No.3; 2001; pp.209-221.
- [21] Tsai, W.T.; Chang, C.Y.; Wang, S.Y.; Chang, C.F.; Chien, S.F.; Sun, H.F.; "Cleaner Production of Carbon Adsorbents by Utilizing Agricultural Waste Corn Cob;" *Resources, Conservation and Recycling*; Vol.32; No.1; 2001; pp.43-53.
- [۲۲] نقاش صبحی؛ ابراهیم؛ حذف فلزهای سنگین از فاضلابهای صنعتی توسط خاکستر؛ پایان نامه کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ۱۳۷۷.
- [23] Franson, M.A.II.; Greenberg, A.E.; Clesceri, L.S.; Eaton, A.D.; *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*; 18th Edition; American Public Health Association; 1992.
- [24] Adams, V.D.; Cowan, P.A.; Pitts, M.E.; Porcella, D.B.; Seierstad, A.J.; *Analytical Procedures for Selected Water Quality Parameters*; Utah State University; 1981; pp.74-76
- Selected Metal Ions from Aqueous Solution Using Modified Corncobs;" *Bioresource Technology*; Vol.78; No.2; 2001; pp. 133-139.
- [11] Senthilkumar, S.; Bharathi, S.; Nithyanandhi, D.; Subburam, V.; "Biosorption of Toxic Heavy Metals from Aqueous Solutions;" *Bioresource Technology*; Vol. 75; 2000; pp.163-165.
- [12] Al-Asheh, S.; Banat, F.; Al-Omari, R.; Duvnjak, Z.; "Predictions of Binary Sorption Isotherms for the Sorption of Heavy Metals by Pine Bark Using Single Isotherm Data;" *Chemosphere*; Vol. 41; 2000; pp.659-665.
- [13] Ricou-Hoeffler, P.; Lecuyer, I.; Leclourec, P.; "Experimental Design Methodology Applied to Absorption of Metallic Ions onto Fly Ash;" *Water Research*; Vol.35; No.4; 2001; pp.965-976.
- [14] Hequet, V.; Ricou, P.; Lecuyer, I.; Le Cloirec, P.; "Removal of Cu^{2+} and Zn^{2+} in Aqueous Solutions by Sorption onto Mixed Fly Ash;" *Fuel*; Vol. 80; No.6; 2001; pp.851-856.
- [15] Iyer, R.S.; Scott, J.A.; "Power Station Fly Ash – A Review of Value – Added Utilization Outside of the Construction Industry;" *Resources, Conservation and Recycling*; Vol. 31; No.3; 2001; pp.217-228.
- [16] Lin, Chien-Jung; Chang, Jun-En; "Effect of Fly Ash Characteristics on the Removal of Cu(II) from Aqueous Solution;" *Chemosphere*; Vol. 44; No.5; 2001; pp.1185-1192.
- [17] Rajeshwarisivaraj; Sivakumar, S.; Senthilkumar, P.; Subburam, V.; "Carbon from Cassava Peel, an Agricultural Waste, as an Adsorbent in the Removal of Dyes and Metal Ions from Aqueous Solution;" *Bioresource Technology*; Vol.80; No.3;