



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال سوم، شماره‌ی ۱۳
زمستان ۱۳۹۱، صفحات ۱۸-۱۱

سنتز نانوذرات پلی دوپامین و کاربرد آن در جذب سطحی یون‌های جیوه (II) از محلول‌های آبی

علی اشتری

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، ایران

پروین غربانی

گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، ایران

چکیده

نانوذرات پلی دوپامین با استفاده از محلول قلیایی دوپامین هیدروکلرید در طول مدت ۲۰ ساعت سنتز شد. محلول قهوه‌ای تیره حاصل خشک گردید تا اینکه نانوذرات بسیار سبک پلی دوپامین با میانگین اندازه ۴۴ نانومتر تهیه گردید. مورفولوژی و ساختار نانوذرات پلی دوپامین با استفاده از روش‌های اسپکتروسکوپی XRD، FT-IR، SEM و TEM مورد بررسی قرار گرفت. از نانوذرات پلی دوپامین به عنوان یک جاذب برای حذف یون‌های جیوه از محلول‌های آبی استفاده شد. اثر برخی از عوامل مانند pH، قدرت یونی، دما، غلظت اولیه نمونه‌های جذب شونده و مدت زمان تماس بر میزان جذب ترکیبات جذب شونده توسط نانو ذرات پلی دوپامین مورد بررسی قرار گرفت. فرایند جذب از هر دو مدل هم‌دمای جذب فروندولچ و تمکین پیروی می‌کند، اما با توجه به نتایج به دست آمده از ضرایب خطی، هم‌دمای فروندولچ برای توصیف فرایند جذب بهتر از هم‌دمای تمکین بود. ظرفیت جاذب (q_m) برای جیوه ۱/۰۷۲ میلی گرم به ازای هر گرم از جاذب به دست آمد. معادلات سینتیکی نشان داد که جذب از سینتیک شبه درجه دو تبعیت می‌کند.

کلید واژه‌ها: نانوذرات پلی دوپامین، جذب سطحی، یون‌های جیوه.

مقدمه

خاصیت احیاء کنندگی پلی‌دوپامین، باعث شده است که یون‌های فلزی بر روی سطحی که از پلی‌دوپامین پوشیده شده است، احیاء شده و به صورت یک لایه کاملاً یکنواخت، ته نشین شوند [۶].

روش آزمایش

محلول دوپامین هیدروکلرید به غلظت ۲ mg/ml در بافر تریس/ اسید کلریدریک به غلظت ۱۰ mM با pH= ۸/۵ تهیه شد. رنگ محلول در ابتدا بی رنگ بود که بتدریج با گذشت زمان ابتدا در دقایق اولیه قهوه‌ای و سپس تیره رنگ شد. بعد از گذشت ۲۰ ساعت نانوذرات تیره رنگ پلی‌دوپامین به خوبی قابل رویت بودند. حلال زدایی و خشک کردن محلول نانوذرات پلی‌دوپامین به روش استخراج انجام گرفت. بدین صورت که: ۵۰ سی سی تولوئن داخل محلول تهیه شده ریخته و در حدود ۴ gr سولفات سدیم به آن اضافه گردید. با محلول NaOH ۵ مولار pH محلول روی عدد ۱۲ تنظیم گردید. بعد از این که محلول ۱۵ دقیقه توسط همزن مغناطیسی هم زده شد، داخل قیف دکانتور ریخته شد و بعد از ۲۰ دقیقه فاز آبی در پایین و لایه نانوذرات پلی‌دوپامین در وسط و تولوئن در بالا مشخص بودند. توسط شیر تخلیه قیف دکانتور فاز آبی آن تخلیه گردید و سپس نانوذرات پلی‌دوپامین به داخل یک ظرف شیشه ای مسطح منتقل گردید. سپس نانوذرات پلی‌دوپامین به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط خشک گردیدند. نانوذرات پلی‌دوپامین را داخل هاون کوبیده و به صورت پودر در آورده شد.

بدین ترتیب نمونه‌ها برای انجام آزمایشات میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش اشعه ایکس و طیف سنجی انتقال فوریه مادون قرمز (FT-IR) آماده شدند. اثر برخی از عوامل مانند pH، قدرت یونی، دما، غلظت اولیه نمونه‌های جذب شونده و مدت زمان تماس بر میزان جذب ترکیبات جذب شونده توسط نانوذرات پلی‌دوپامین مورد بررسی قرار گرفت.

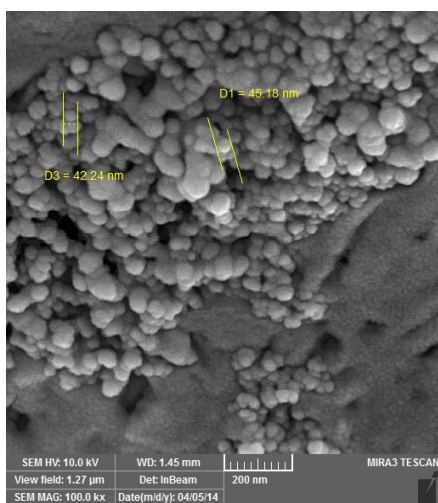
آب به عنوان مهم‌ترین ماده طبیعت و حیاتی‌ترین رکن زندگی جوامع انسانی همواره اهمیت بسیار زیادی در سلامت جامعه ایفا نموده است و آلودگی آب همواره یک تهدید زیست محیطی بوده است. پساب‌های صنعتی به دلیل نبود برنامه ریزی جامع و بی‌توجهی به ملاحظات زیست محیطی یکی از عوامل تهدید کننده منابع آبی کشور به شمار می‌روند. جهت جلوگیری از ورود آلاینده‌های زیست محیطی به آب و محیط زیست و نزدیک کردن میزان این آلاینده‌ها به استانداردهای جهانی آب و پساب، بایستی کارگاه‌ها و کارخانه‌های صنعتی به سیستم‌های تصفیه آب و پساب مجهز شوند [۱]. از جمله آلاینده‌های آب، می‌توان به فلزات سنگین از جمله جیوه اشاره کرد.

در سال‌های اخیر از روش‌های جذب سطحی بر روی انواع مختلفی از بسترها و مواد جاذب برای حذف آلودگی‌های آب استفاده می‌شود که بیوپلیمرها نقش مهمی را در این زمینه دارا می‌باشند [۲-۵].

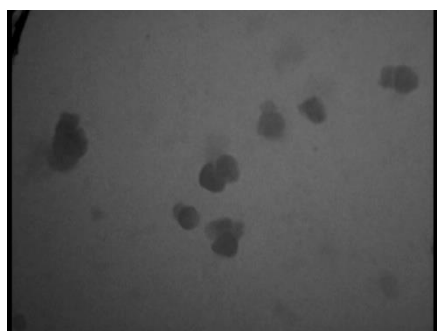
دوپامین در محلول‌های قلیایی اکسید شده و محصول اکسایش آن بیوپلیمری به نام پلی‌دوپامین می‌باشد که به عنوان یک پلیمر احیا کننده خواص بسیار جالبی از خود نشان می‌دهد. مطالعات اخیر نشان داده است که این پلیمر بسیار پایدار بوده و توانایی احیاء و جذب بسیاری از مولکول‌های آلی و غیر آلی و در برخی مواقع یون‌های محلول در آب را دارا می‌باشد. به طوری که با پلیمریزاسیون دوپامین، در سطح بسیاری از مواد نظیر فلزات بی اثر (پالادیم، پلاتین، نقره و استاتین)، فلزات دیگر نظیر مس، اکسید فلزات (اکسید آلومینیوم، اکسید سیلیسیم، کریستال-های اکسید سیلیسیم (کوارتز) و اکسید تیتانیم)، سرامیک‌ها (شیشه و هیدروکسی آپاتیت)، پلی‌اورتان‌ها (کربوتان و تکوفلکس)، پلیمرهای سنتزی (پلی‌کربنات، پلی‌استایرن و پلی‌دی‌متیل سیلوکسان) و حتی سایر پلیمرهای متداول، روکش‌های بسیار نازکی از پلی‌دوپامین تهیه می‌شود که کاربردهای زیادی از آن‌ها گزارش شده است. پلی‌دوپامین تشکیل شده می‌تواند با گروه‌های آمین و تیول از طریق واکنش‌های شیفت-باز یا افزایش مایکل ترکیب شود.

آنالیز میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) و عبوری (TEM) نانوذرات پلی دوپامین

جهت پی بردن به توزیع اندازه، مورفولوژی و شکل نانوذرات پلی دوپامین تهیه شده، از آنالیز میکروسکوپی الکترونی روبشی و میکروسکوپی الکترونی عبوری استفاده شده است. نمونه نانوذرات تهیه شده پس از حلال زدایی و خشک شدن، تحت آنالیز SEM و TEM قرار گرفت. شکل (۳) تصاویر میکروسکوپی ثبت شده از نانوذرات پلی دوپامین تهیه شده، توسط دستگاه SEM و شکل (۴) تصاویر TEM آن را نشان می دهند.



شکل ۳. تصویر SEM نانوذرات پلی دوپامین با بزرگنمایی ۱۰۰



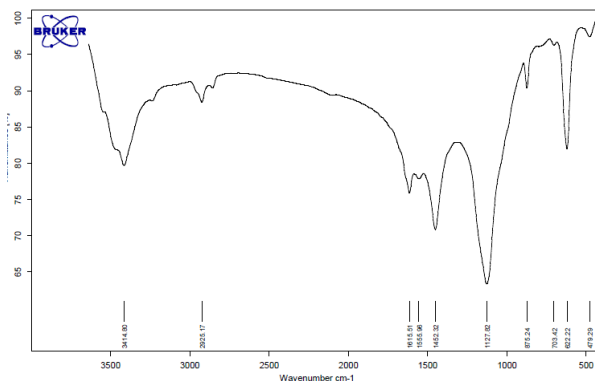
شکل ۴. تصویر TEM نانوذرات پلی دوپامین

با توجه به تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و عبوری گرفته شده از نانوذرات تهیه شده، مشخص است که نانوذرات تهیه شده دارای مورفولوژی تقریباً یکسان کروی می باشند. اندازه ذرات بین ۴۲ تا ۴۵ نانومتر می باشد.

آنالیز پراش اشعه X نانوذرات پلی دوپامین تهیه شده
اندازه متوسط دانه‌ها با استفاده از فرمول شرر، بر مبنای رابطه‌ی زیر تعیین گردید:

بررسی طیف FT-IR نانوذرات پلی دوپامین تهیه شده

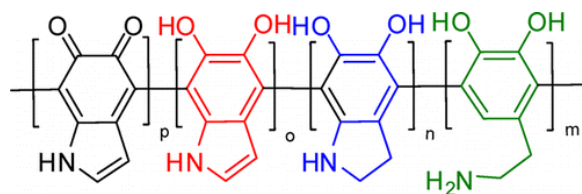
شکل (۱) طیف FT-IR نانوذرات پلی دوپامین را نشان می - دهند.



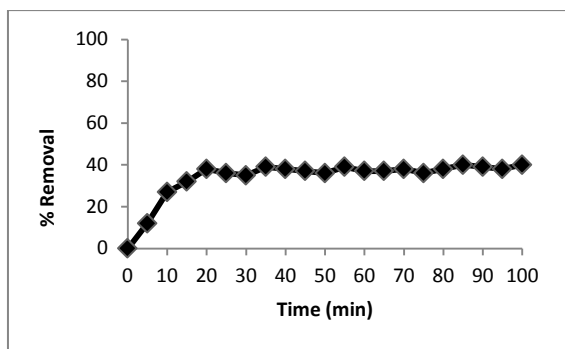
شکل ۱: طیف FT-IR پلی دوپامین

در طیف FT-IR پلی دوپامین ارتعاشات کششی مربوط به N-H در 3414 cm^{-1} مشاهده می شود، البته ارتعاشات کششی مربوط به گروه‌های O-H به صورت پهن در ناحیه $3200\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ مشاهده می شود. علاوه بر این در منطقه بالای 3000 cm^{-1} ارتعاشات کششی C-H آروماتیک و در 2925 cm^{-1} ارتعاشات کششی C-H آلیفاتیک مشاهده می شود. هم چنین پیک مشاهده شده در 1615 cm^{-1} و 1555 cm^{-1} را نیز می توان به وجود بخش ایندولی در ساختار این پلیمر نسبت داد. پیک مشاهده شده در 1127 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی C-O و C-N می باشد.

وجود این پیک‌های ارتعاشی در طیف FT-IR پلی دوپامین و مطالعه منابع درباره ساختار پلی دوپامین [۷ و ۸] مشخص می کند که ساختار نانوذرات سنتزی با شکل (۲) مطابقت بیشتری دارد.



شکل ۲: ساختار پیشنهادی نانوذرات پلی دوپامین



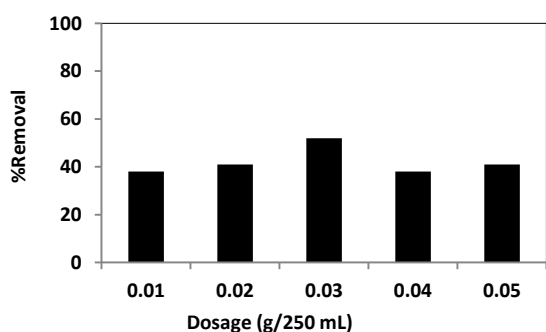
شکل ۶: نمودار اثر زمان بر میزان جذب یونهای جیوه

مقدار جذب: ۰/۰۲ gr/۲۵۰mL، غلظت محلول جیوه: mg/L، pH=۳/۸ و ۵۰ زمان تماس ۱۰۰ دقیقه

با توجه به شکل (۶) مقدار جذب یونهای جیوه بر روی جاذب تا دقیقه ۲۰، رفته رفته افزایش یافته و بعد از زمان ۲۰ دقیقه به حالت ثابتی می‌رسد. با توجه به این که هر جاذب در برابر یک جذب شونده مشخص دارای تعداد معینی مکان جذب بوده و روی هر مکان جذب، فقط یک مولکول جذب شونده، جذب شده و یک تک لایه‌ای نامتحرک را به وجود می‌آورد. بنابراین پس از جذب یک لایه از جذب-شونده روی جاذب، دیگر جذبی صورت نخواهد گرفت و فرایند به حالت پایداری خواهد رسید.

۲- اثر مقدار جاذب بر روی درصد حذف یونهای جیوه

تاثیر مقدار جاذب بر روی درصد حذف در نمودار زیر نشان داده شده است.



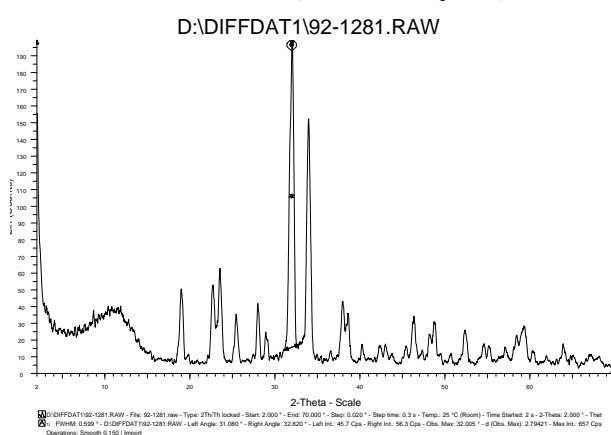
شکل ۷: تاثیر مقدار جاذب (g/250 mL) بر میزان درصد حذف Hg^{2+} ، غلظت محلول جیوه ۵۰ میلی گرم در لیتر و زمان تماس ۲۰ دقیقه

تاثیر مقدار جاذب در درصد حذف یونهای Hg^{2+} در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان جاذب تا ۰/۰۳g/۲۵۰mL، درصد حذف افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش تعداد جایگاه‌های فعال در

$$\text{رابطه (۱)} \quad D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta}$$

که در آن، D قطر متوسط دانه‌ها (برحسب نانومتر)، β عرض پیک در نصف ارتفاع (بر حسب رادیان)، λ طول موج اشعه مورد استفاده (بر حسب نانومتر) و θ زاویه تفرق بلندترین پیک (بر حسب رادیان) می‌باشد. این رابطه زمانی مورد استفاده است که اندازه دانه‌های کریستالی کمتر از $1000^\circ A$ باشد.

زاویه تفرق بلندترین پیک برحسب رادیان در طیف پلی‌دوپامین عدد ۱۶ انتخاب شد و قطر متوسط دانه‌ها با استفاده از رابطه شرر ۵۰nm محاسبه شد.



شکل ۵: طیف XRD پلی‌دوپامین

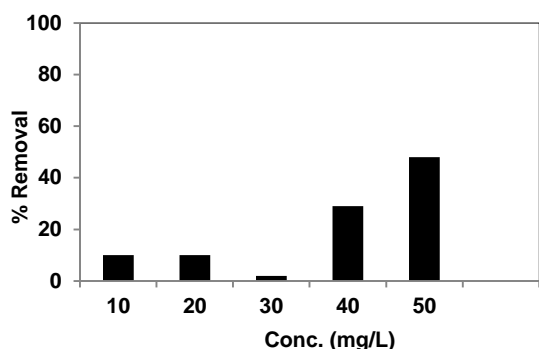
نتایج به‌دست آمده از مشاهده دانه‌ها در زیر میکروسکوپ الکترونی روبشی با نتایج محاسبه اندازه دانه‌ها به وسیله رابطه شرر تقریباً همخوانی داشته و با هم مطابقت می‌کنند.

اثر عوامل مختلف بر میزان جذب یون جیوه بر روی نانوذرات پلی‌دوپامین

۱- اثر زمان تماس مواد جذب شونده و جاذب در فرایند جذب

توزیع ماده جذب شونده مابین جاذب و محلول متأثر از زمان تماس است. تاثیر زمان بر میزان جذب در دمای اتاق بررسی شد. این بررسی زمان رسیدن به تعادل بین جاذب و ماده جذب شونده را به ما می‌دهد. درصد حذف در فاصله‌های زمانی معین با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شده و نمودار زیر روند تغییرات درصد حذف با گذشت زمان را نشان می‌دهد.

$$\text{رابطه (۲)} \quad \% \text{ Removal} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100$$

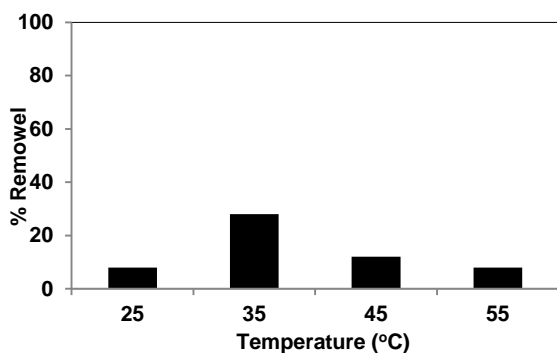


شکل ۹: تاثیر غلظت اولیه یون‌های جیوه بر روی درصد حذف Hg^{2+} ، شرایط آزمایشی: $pH=3/8$ ، میزان جاذب $0.2/50$ گرم بر میلی لیتر محلول و زمان تماس ۲۰ دقیقه

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت اولیه یون‌های جیوه، میزان حذف افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش غلظت اولیه، تعداد یون‌های Hg^{2+} در محلول زیاد شده و در نتیجه رقابت برای دسترسی به جایگاه‌های فعال موجود بر روی نانوذرات پلی دوپامین افزایش می‌یابد و همه جایگاه‌ها در معرض برخورد با یون‌های Hg^{2+} قرار می‌گیرند.

۵- اثر دما

تاثیر دماهای مختلف بر میزان حذف یون‌های Hg^{2+} مورد بررسی قرار گرفته و نمودار تغییرات درصد حذف نسبت به دما برای ماده جاذب شونده رسم گردید.



شکل ۱۰: تاثیر دما در فرایند جذب یون‌های جیوه توسط نانوذرات پلی-دوپامین

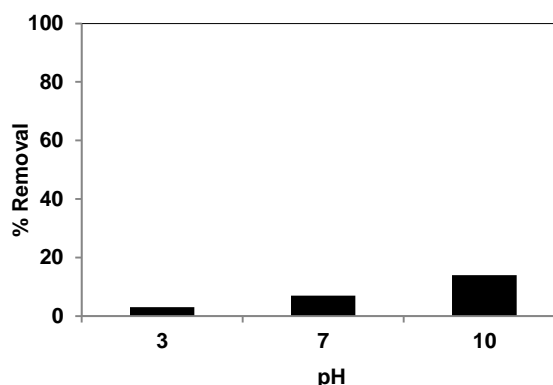
شرایط آزمایشی: $pH=3/8$ ، میزان جاذب $0.2/50$ g/mL، غلظت محلول جیوه ۵۰ میلی گرم در لیتر و زمان تماس ۲۰ دقیقه

مطابق شکل (۱۰) ابتدا با افزایش دما تا $35^{\circ}C$ درصد حذف افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش انرژی جنبشی یون‌های

روی سطح نانوذرات پلی دوپامین می‌باشد. اما با افزایش بعدی میزان جاذب، درصد حذف کاهش می‌یابد که شاید به دلیل کلوخه شدن نانوذرات پلی دوپامین و کاهش کارایی نانوذرات باشد.

۳- اثر pH

برای بررسی تاثیر pH بر میزان حذف یون‌های جیوه توسط جاذب، میزان حذف یون‌های جیوه در pH های ۳، ۷ و ۱۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به صورت نمودار تغییرات درصد حذف در مقابل تغییرات pH رسم شد.



شکل ۸: اثر تغییرات pH بر میزان درصد حذف یون‌های جیوه، مقدار جاذب $0.2/250$ g/mL، غلظت محلول جیوه ۵۰ میلی گرم در لیتر و زمان تماس ۲۰ دقیقه

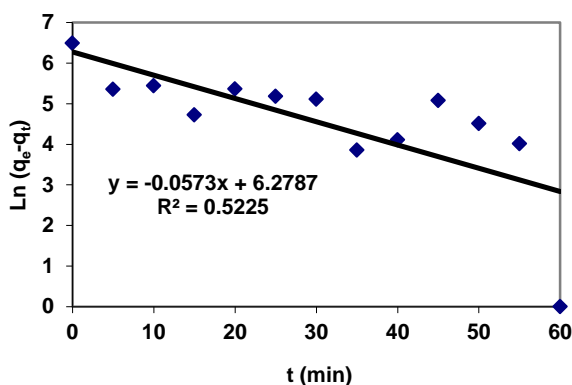
نتایج به دست آمده از بررسی شکل (۸) نشان می‌دهد که بیشترین میزان حذف یون‌های جیوه توسط نانوذرات پلی دوپامین در pH های بالاتر اتفاق می‌افتد. یعنی با افزایش pH میزان حذف افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل کاهش رقابت بین یون‌های H^+ و یون‌های Hg^{2+} برای جذب روی سطح جاذب در pH های بالاتر باشد، زیرا با افزایش pH یون‌های H^+ کاهش می‌یابد.

۴- اثر غلظت اولیه یون‌های Hg^{2+}

میزان جذب ماده جاذب شونده توسط جاذب بیوپلیمری با تغییر غلظت اولیه و ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها بررسی گردید (شکل ۹).

$$\text{Ln}(q_e - q_t) = \text{Ln}q_e - k_1 t \quad \text{رابطه (۳)}$$

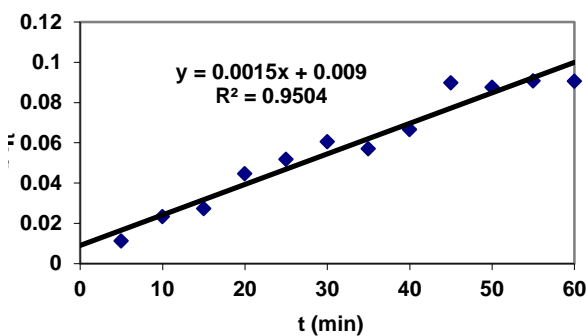
که در آن q_e و q_t مقدار جذب شونده بر حسب میلی گرم در حال تعادل و در زمان t دقیقه است و k_1 (min^{-1}) ثابت سرعت فرایند جذب شبه درجه اول می باشد. با رسم $\text{Ln}(q_e - q_t)$ بر حسب t می توان ثابت سرعت k_1 را از روی شیب خط حاصله به دست آورد.



شکل ۱۲: نمودار سرعت شبه درجه اول جذب یون‌های جیوه بر روی نانوذرات پلی‌دوپامین
معادله سرعت شبه درجه دوم نیز توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن k_2 ثابت سرعت فرایند جذب شبه درجه دوم می باشد. در این مورد هم ثابت سرعت از روی شیب خط حاصل از رسم t/q_t در برابر t به دست می‌آید.

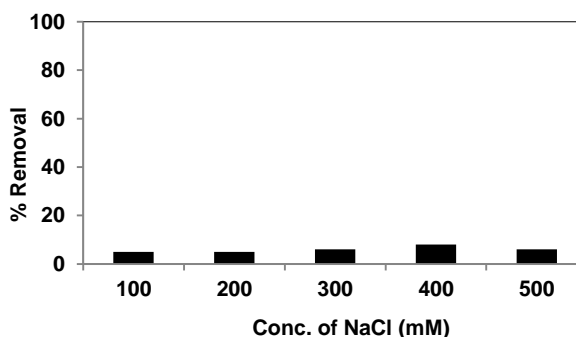


شکل ۱۳: نمودار سرعت شبه درجه دوم جذب یون‌های جیوه بر روی نانوذرات پلی‌دوپامین
با توجه به ضرایب همبستگی، نتایج به دست آمده از مطالعات سینتیکی حاکی از تبعیت فرایند جذب یون‌های جیوه توسط نانوذرات پلی‌دوپامین از معادله شبه درجه دوم می باشد.

Hg^{2+} و در نتیجه افزایش تعداد برخورد های یون‌های Hg^{2+} به سطح نانوذرات پلی‌دوپامین می‌باشد. از طرف دیگر با افزایش دما تا 55°C درصد حذف کاهش می‌یابد که به این دلیل می‌باشد که مکان‌های مناسب جذب در دماهای پایین فعال بوده و با افزایش دما از فعالیت آن‌ها کاسته می‌شود.

۶- اثر قدرت یونی محلول

برای بررسی تاثیر قدرت یونی در میزان جذب یون‌های جیوه، از نمک سدیم کلرید در محدوده غلظت‌های ۱۰۰ الی ۵۰۰ میلی‌مولار استفاده شد. نتایج به صورت نمودار تغییرات درصد حذف در مقابل تغییرات غلظت سدیم کلرید (mM) در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

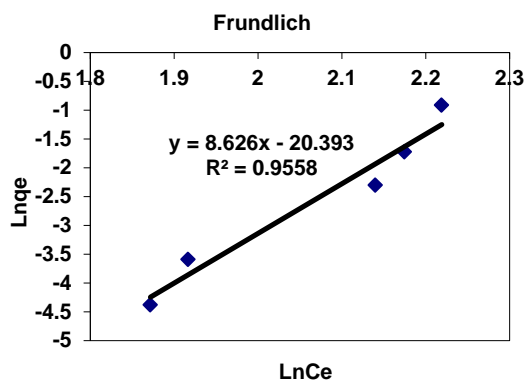


شکل ۱۱: اثر تغییرات غلظت سدیم کلرید بر میزان حذف یون‌های جیوه
شرایط آزمایشی: $\text{pH}=3/8$ ، میزان جاذب $0/2 \text{ g}/250 \text{ mL}$ ، غلظت محلول جیوه 50 میلی‌گرم در لیتر و زمان تماس 20 دقیقه

در این مورد همان‌طور که در نمودار مشخص است، غلظت سدیم کلرید تاثیر اندکی در میزان جذب یون‌های جیوه دارد. فقط تا حدودی غلظت 400 میلی‌مولار سدیم کلرید در میزان جذب تاثیر داشته که آن هم چشمگیر نیست. در واقع می‌توان گفت افزودن سدیم کلرید بر روی محلول یون‌های جیوه اثری در نیروی جذب آن بر روی نانوذرات پلی‌دوپامین ندارد.

مطالعه سینتیکی جذب

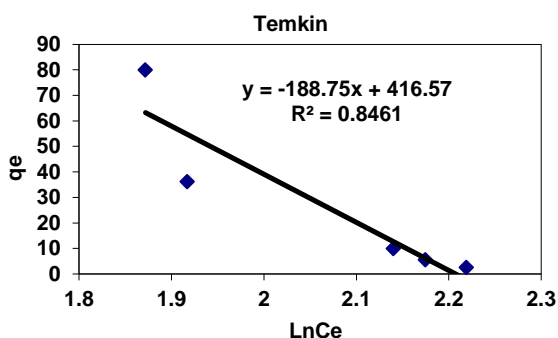
جهت انجام مطالعات تکمیلی و به منظور تعیین مدل سینتیکی توصیف کننده این فرایند و به دست آوردن ثابت‌های سرعت مربوطه، داده‌های به دست آمده از این بخش در معادلات شبه درجه اول و شبه درجه دوم فیت گردید. معادله سرعت شبه درجه اول به صورت زیر می باشد:



شکل ۱۵: ایزوترم جذب فروندلیچ در فرایند جذب یونهای Hg^{2+} بر روی نانوذرات پلی دوپامین

۳- ایزوترم جذب تمکین

ایزوترم جذب تمکین یا معادله تمکین یکی دیگر از ایزوترمهای جذب است. در این ایزوترم مقدار ماده جذب شده با لگاریتم فشار جذب شونده متناسب است. شکل (۱۶) ایزوترم جذب تمکین بر حسب رابطه (۷) را نشان می دهد.

$$q_e = B_1 \ln C_e + B_1 \ln k_t \quad \text{رابطه (۷)}$$


شکل ۱۶: ایزوترم جذب تمکین در فرایند جذب یونهای Hg^{2+} بر روی نانوذرات پلی دوپامین

مطابق شکل های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) چون مقدار R^2 در ایزوترم فروندلیچ به یک نزدیک تر است، بنابراین فرایند جذب یونهای جیوه بر روی نانوذرات پلی دوپامین از ایزوترم فروندلیچ تبعیت می کند که در این ایزوترم فرض بر این است که جذب چند لایه اتفاق می افتد.

نتیجه گیری

در این پژوهش نانوذرات پلی دوپامین با استفاده از یک روش ساده شیمیایی سنتز شدند. ماهیت نانو ذره بودن و ساختار بیوپلیمر پلی دوپامین توسط روش های اسپکتروسکوپی و میکروسکوپی تایید شد. نتایج حاصل از

لذا ثابت سرعت معادله شبه درجه دوم و مقدار q_e آن از روی نمودار محاسبه شده و در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- ثابت سرعت شبه درجه دوم و ضرایب همبستگی

مرتبۀ واکنش	$k_2(Lmol^{-1}min^{-1})$	R^2	q_e (mg)
شبه درجه دوم	0.11×10^{-3}	۰/۹۵۰	۱۰۰۰

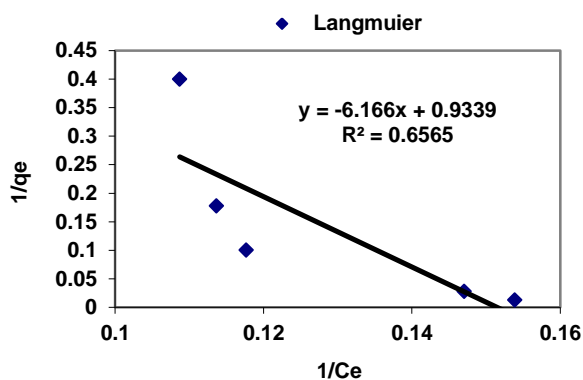
ایزوترمهای جذب سطحی یونهای جیوه بر روی نانوذرات پلی دوپامین

سه ایزوترم جذب لانگمویر، فروندلیچ و تمکین برای فرایند جذب یونهای جیوه بر روی نانوذرات پلی دوپامین مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱- ایزوترم جذب سطحی لانگمویر

مطابق رابطه (۵)، نمودار $1/q_e$ بر حسب $1/C_e$ رسم شده و نتایج در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m k_b C_e} + \frac{1}{q_m} \quad \text{رابطه (۵)}$$



شکل ۱۴: ایزوترم جذب لانگمویر در فرایند جذب یونهای Hg^{2+} بر روی نانوذرات پلی دوپامین

با استفاده از رابطه (۵) و نمودار (۱۴)، مقادیر $q_m = 1/0.72$ و $K_b = -0/151$ به دست آمد.

۲- ایزوترم جذب فروندلیچ

از این ایزوترم بیشتر برای مطالعه جذب اجزای حل شده در یک محلول استفاده می شود و بر پایه جذب سطحی بر روی سطح یکنواخت می باشد. نمودار بر اساس رابطه (۶) رسم شده است.

$$\ln q_e = \frac{1}{n} \ln C_e + \ln k_f \quad \text{رابطه (۶)}$$

منابع

۱- مومنی طباطبایی، ص.، مزده وری، ح.، تاج خلیلی، الف.، شیمی آب و تصفیه آب‌های صنعتی. اهر: انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی، چاپ اول، ۱۳۸۹.

2- Tang, Z.X., Shi, L.E., Adsorption of natural proteinase on chitosan nanoparticles, *Biotechnology*, pp. 223 – 228, 2007.

3- Djokovic, D., Krsmanovic, R., Bozanic, D.K., McPherson, M., Van Tendeloo, G., Nair, P.S., Georges, M.K. and Radhakrishnan, T., Adsorption of sulfur onto a surface of silver nanoparticles stabilized with sago starch biopolymer, *Colloid surface B*, Vol. 73, pp. 30-35, 2009.

4- Kostal, J., Prabhukumar, G., Lao, O.L., Chen, A., Matsumoto, M., Mulchandani, A., Chen, W., Customizable biopolymers for heavy metal remediation. *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 7, pp. 517-523, 2005.

5- Postma, A., Yan, Y., Wang, Y., N. Zelikin, A., Tjijto, E., Caruso, F., Self-Polymerization of Dopamine as a Versatile and Robust Technique to Prepare Polymer Capsules, *Chemistry of Materials*, Vol. 21, pp. 3042-3044, 2009.

6- Disbudak, A., Bektas, S., Pat R, S., Genc, O. Denizli, A., Cysteine-metal affinity chromatography: determination of heavy metal adsorption properties. *Separation and Purification Technology*, Vol. 26, pp. 273-281, 2002.

7- Dreyer, D. R., Miller, D. J., Freeman, B. D., Paul, D. R. and Bielawski, C. W., Elucidating the Structure of Poly(dopamine), *Langmuir*, Vol. 28, pp. 6428–6435, 2012.

8- Liebscher, J., Mrówczyński, R., Scheidt, H. A., Filip, C., Hädade, N. D., Turcu, R., Bende, A., Beck, S., The structure of polydopamine - a never ending story?, *Langmuir*, Vol. 29, pp. 10539-10548, 2013.

طیف سنجی مادون قرمز نشان داد که طی اکسیداسیون دوپامین، مونومرهای دوپامین کینون تولید می‌شوند. این مونومرهای تولید شده طی واکنش شیف- باز ساختار بیوپلیمری پلی دوپامین را از طریق اتصال گروه‌های کتون به گروه‌های آمینی شکل می‌دهند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی بیانگر تولید نانوذرات کروی شکل با توزیع اندازه مناسب و اندازه متوسط ۴۴ نانومتر می‌باشند. نتایج حاصل از پراش اشعه X نیز این نتایج را تایید کردند.

در این مطالعه همچنین فرایند جذب یون‌های جیوه توسط نانوذرات پلی دوپامین مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی عوامل مختلف بر میزان جذب یا حذف ماده جذب شونده و مطالعات اسپکتروسکوپی و میکروسکوپی نشان دادند که:

۱- مدت زمان تعادلی جذب یون‌های جیوه بر روی نانوذرات پلی دوپامین ۲۰ دقیقه بود.

۲- نتایج نشان داد با افزایش pH و غلظت اولیه یون‌های جیوه میزان درصد حذف بر روی نانو ذرات پلی دوپامین افزایش می‌یابد.

۳- اثر دوز جاذب نشان داد که افزایش آن در مقادیر پایین تر باعث افزایش و سپس کاهش درصد حذف می‌شود.

۴- مطابق نتایج افزایش دما اثر منفی روی درصد حذف یون‌های جیوه داشته و افزایش سدیم کلرید نیز تاثیری روی میزان و درصد حذف یون‌های جیوه نداشت.

۵- مطابق نتایج جذب یون‌های جیوه بر روی سطح نانوذرات پلی دوپامین از سینتیک شبه مرتبه دوم و از ایزوترم جذب سطحی فروندلیچ تبعیت می‌کند.