

جذب یون نیکل و کادمیم از محلول آبی توسط نانو فولرن اصلاح شده با تتراهیدروفلوران

لیلا مهدویان

گروه شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد، واحد دورود

چکیده

حذف یون نیکل و کادمیم توسط نانوفولرن-اصلاح شده بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نانو فولرن بکار رفته C_{60} می باشد که با اصلاح این نانوذره توسط تتراهیدروفلوران می توان شرایط بهینه حذف یون نیکل و کادمیم مانند، pH، غلظت جذب شونده، مقدار جاذب، زمان، دما و ... را ارزیابی و بدست آورد. یون کادمیم در غلظت 6 ppm ، $\text{pH}=6$ ، مقدار نانوجاذب 0.1 گرم، دما 303 K ، زمان 90 دقیقه دارای بیشترین راندمان جذب معادل 97.04% می باشد که برای یون نیکل، $\text{pH}=5$ ، مقدار نانو جاذب 0.1 گرم، دما 303 K و زمان 120 دقیقه. سپس با استفاده از مدل های ایزوترم جذب، جذب سطحی یون کادمیم دو ظرفیتی توسط نانوجاذب ارزیابی می شود، نتایج نشان می دهد که ضریب همبستگی مدل های ایزوترم بکار رفته عبارتند از: دابینین-رادوشکویچ < لانگمیر < فریندلیچ < تمکین. بررسی مدل های ایزوترم نشان می دهد که جذب فیزیکی، تک لایه و گرمازا است با افزایش دما میزان جذب کاهش یافته و می توان نانوجاذب را بازیافت نمود.

واژه های کلیدی: ایزوترم جذب، یون نیکل و کادمیم، نانوفولرن اصلاح شده، تتراهیدروفلوران.

ایمیل نویسنده مسئول: Mahdavian@iau-doroud.ac.ir

۱-مقدمه

با توجه به ورود روزافزون پساب شرکت های صنعتی به محیط زیست، یکی از معضلات ایجاد شده در محیط، مخصوصاً آب های جاری و زیرزمینی، ورود یون های و املاح فلزات سنگین می باشد. جداسازی و طراحی فیلتر برای حذف این آلاینده ها در منبع تولید یکی از مسائل مورد نظر محققان و متخصصین شیمی محیط زیست می باشد. در این راستا و جهت نیل به این مهم، پروژه اندازه گیری فلزات سنگین سرب، روی و کادمیم در رودخانه های استراتژیک کشور، بررسی مقدار آلاینده موجود در رودخانه ها و شناسایی منابع ورود آنها امری مهم و حیاتی محسوب می شود.

کادمیم عنصری فلزی و نرم به رنگ سفید مایل به آبی است. این عنصر به عنوان محصول فرعی از تصفیه روی به دست می آید و بیشتر خصوصیات آن شبیه روی است. کادمیم و ترکیبات آن بسیار سمی است. به طور طبیعی سالیانه حدود 25000 تن کادمیم وارد محیط زیست می شود [۱]. حدود نیمی از این کادمیم از طریق هوازدگی سنگ ها وارد رودخانه ها می شود. آتش سوزی جنگل ها و آتش فشان ها، فعالیت های بشری مانند شیرابه های زباله های صنعتی، تولید کودهای فسفاته مصنوعی از منابع مهم منتشر کننده کادمیم هستند [۲]. این عنصر عمدتاً از راه غذاهایی مانند جگر، قارچ، صدف رودخانه ای و ... که کادمیم بالایی دارند، وارد بدن انسان شده و نهایتاً در کلیه تجمع می یابد. از عوارض نامطلوب حضور آن در بدن می توان به اسهال، شکم درد و استفراغ شدید، شکستگی استخوان، عقیم شدن، آسیب به سیستم عصبی مرکزی، آسیب به سیستم ایمنی، ناهنجاری های روانی و

آسیب احتمالی به DNA و سرطان اشاره کرد [۳، ۴]. حداکثر مجاز کادمیم در آب آشامیدنی، بر مبنای متوسط مصرف روزانه آب آشامیدنی معادل با $2/5$ لیتر، برای انسانی به وزن 70 کیلوگرم، 0.05 ppm است [۵].

برای جداسازی و حذف یون های فلزی مانند یون کادمیم (Cd^{2+}) روش های مختلفی مانند: رسوب دهی [۶]، تبدیل یونی [۷]، فرایند-های غشایی [۸]، الکترولیز [۹] و جذب سطحی [۱۰] وجود دارد. جذب سطحی در مقایسه با دیگر روش ها با توجه به بازدهی بالا، کنترل آسان و هزینه های عملیاتی کمتر می تواند یک فرایند جایگزین مناسب تلقی گردد [۱۱]. فرایند جذب سطحی به جاذبی با ویژگی هایی مانند مساحت سطح ویژه بالا، بازدهی زیاد، عمر و مقاومت مکانیکی مناسب نیاز دارد [۱۲]. مواد جاب باید به آسانی در دسترس بوده و ضمناً ارزان باشند و به سادگی بازیابی شوند.

یکی از جاذب ها، که در سال های اخیر نظر دانشمندان را به خود معطوف نموده، نانوفولرن است. نانوفولرن ها دارای ابعاد و اندازه-ای متفاوت با خواص شیمیایی منحصر بفرد هستند که پایدارترین و فراوان ترین فولرن ها انواع C_{60} و C_{70} هستند. بنابراین بیشتر خواص ذکر شده در مورد نانوفولرن ها نیز روی این دو نوع متمرکز شده است. برخی از خواص فیزیکی این دو مولکول در جدول ۱ ارائه شده است [۱۳]. نانوفولرن به خاطر ساختار منحصر به فرد کروی، خواص الکترونیکی و کاربردهای مختلفی دارد. فولرن استخراج شده از دوده به عنوان یک محصول جانبی می باشد. کاربرد این مواد در تصفیه آب هنوز گسترش نیافته است. فولرن استخراج شده از دوده به شکل پودر که شامل گروه آمینو است، توسط

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

۳-۱- بررسی و بهینه کردن پارامترهای موثر بر جذب سطحی یون کادمیم (II) توسط نانوفولرن

برای تعیین منحنی کالیبراسیون، غلظت‌های متفاوتی از محلول نیترات کادمیم (II) با غلظت‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ ppm در دمای محیط ۳۰۳K تهیه و سپس جذب آنها توسط دستگاه جذب اتمی خوانده و منحنی کالیبراسیون رسم و q مقدار فلز جذب شده به ازای واحد گرم جاذب با رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۵].

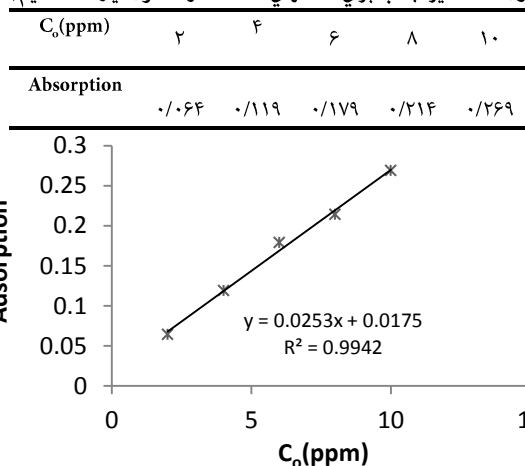
$$q = (C_0 - C_e) \frac{V}{m} \quad (1)$$

در این رابطه q مقدار میلی‌گرم یون فلزی جذب شده بر واحد گرم جاذب (mg/g)، C_0 و C_e به ترتیب غلظت اولیه فلز و غلظت نهایی فلز در زمان t (mg.L^{-1})، V حجم محلول (L) و m جرم جاذب استفاده شده (g) می‌باشد. با ترسیم منحنی کالیبراسیون برای نمونه‌های استاندارد و با غلظت‌های مختلف (جذب در برابر غلظت) نمودار کالیبراسیون قابل محاسبه است. هر چه شیب نمودار کالیبراسیون بیشتر باشد، حساسیت (تغییرات جذب نسبت به غلظت) بیشتر می‌شود. شیب غلظت توسط ضریب جذب تعیین می‌گردد. همچنین با استفاده از رابطه ذیل می‌توان راندمان جذب را محاسبه نمود [۱۶]:

$$\%R = [(C_0 - C_e)/C_0] \times 100 \quad (2)$$

که در این رابطه C_0 غلظت‌های یون فلزی در تعادل بر حسب (mg.L^{-1}) می‌باشد. منحنی کالیبراسیون در شکل ۲ قابل رویت است.

جدول ۲. مقادیر جذب برای غلظت‌های مختلف از محلول نیترات کادمیم (II).



شکل ۲. منحنی کالیبراسیون جذب فلز کادمیم (II) در دمای ۳۰۳ کلون.

۳-۲- بررسی اثر pH

۵۰ میلی لیتر محلول نیترات کادمیم (II) با غلظت ۶ ppm را در pHهای متفاوت به ۰/۱ گرم جاذب نانوفولرن افزوده و در دمای محیط و به مدت زمان ۳ ساعت در دستگاه التراسونیک جهت دیسپرس کردن نانوفولرن قرار داده و سپس محلول‌ها را سانتریفوژ و از کاغذ صافی گذرانده و نهایتاً جذب آنها توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. از نتایج حاصل

واکنش دوده با اتیلن دی آمین تهیه شده است، می‌تواند در جذب آلاینده‌های آلی مورد ارزیابی قرار بگیرد [۱۴]. علاوه بر جذب آلاینده‌ها در جذب ویروس‌های مختلف از جمله HIV مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در این تحقیق نیز از آن برای جذب یون‌های فلزات سنگین (کادمیم) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بررسی اثر پارامترهای مختلفی مانند pH، مقدار جاذب، سرعت هم‌زدن و دما بر فرایند جذب می‌باشد

جدول ۱. خواص فیزیکی نانوفولرن‌های C60 و C70.

	C ₆₀	C ₇₀
حجم مولکولی (cm ³)	۸۷/۱×۱۰ ^{-۲۲}	۴۲/۷
اولین انرژی یونیزاسیون (eV)	۵۸۷	۶۱/۷
انرژی پیوند اتم‌های کربن (eV)	۴۰/۷	۴۲/۷
متوسط فاصله بین اتم‌های کربن (Å)	۴۱/۱	۴۳/۱

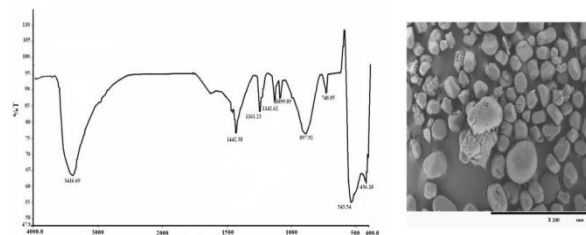
۲- بخش تجربی یا فعالیت‌های آزمایشگاهی

همه مواد شیمیایی مورد نیاز با خلوص تجزیه‌ای بالا از شرکت مرک آلمان تهیه شده‌اند که عبارتند از: اسید کلریدریک، هیدروکسید سدیم، اسید نیتریک، نیترات کادمیم $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$.

وسایل مورد استفاده برای ارزیابی پارامترها و نتایج آن، دستگاه جذب اتمی مدل PG-990 ساخت کشور انگلستان جهت تعیین غلظت یون کادمیم، دستگاه PHmeter metrohm مدل ۸۲۷ ساخت کشور سوئیس جهت اندازه‌گیری و تنظیم pH محلول‌ها، دستگاه التراسونیک bandelin مدل DK203 H ساخت کشور آلمان جهت دیسپرس کردن نانوفولرن و ترازوی چهار رقم اعشار مدل AND جهت توزین مواد شیمیایی ساخت کشور آلمان.

جهت تهیه محلول حاوی کادمیم از نمک فلزی $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ استفاده و برای تنظیم pH محیط از HCl و NaOH استفاده شده است. ابتدا یک محلول ۱۰۰۰ ppm از نیترات کادمیم به عنوان محلول استاندارد ساخته و با اسیدنیتریک ۵۰ درصد حجمی به حجم رسانده و سپس از این محلول و با استفاده از آب دیونیزه محلول ۱۰۰ ppm تهیه و در انتها غلظت‌های ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ ppm برای رسم منحنی کالیبراسیون تهیه گردیده است.

نانوفولرن خریداری شده ساخت کشور اسپانیا، با ۹۹/۹٪ خلوص، وزن مولکولی ۷۲۰/۶۴ گرم، دانسیته ۱/۷۲ g.cm^{-3} ، نقطه ذوب و جوش به ترتیب ۲۸۰، ۵۲۷ درجه سانتی‌گراد و شار حرارتی ۱ w.mK^{-1} می‌باشد که طیف FT-IR تصویر STM آن در شکل ۱ قابل رویت است.



شکل ۱. طیف FT-IR از نانوفولرن C60 و تصویر STM.

جدول ۵. نتایج محاسبات مربوط به جذب یون کادمیم (II) در دماهای مختلف.

T(K)	%T	C _e /ppm	%R
۳۰۳	۰/۰۹۱۳	۳/۰۶	۹۶/۳۷
۳۱۳	۰/۰۹۸۲	۳/۲۹	۸۲/۳۷
۳۲۳	۰/۱۰۰۲	۳/۳۶	۷۸/۴۰
۳۳۳	۰/۱۰۲۹	۳/۴۵	۷۳/۷۵
۳۴۳	۰/۱۱۰۱	۳/۶۹	۶۲/۷۵

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود درصد جذب با افزایش دما کاهش می‌یابد که می‌تواند دلالت بر ماهیت فیزیکی جذب سطحی داشته باشد در حقیقت افزایش دما باعث افزایش آنتروپی و سست شدن پیوند میان گونه‌های جذب شونده و جاذب می‌گردد.

۳-۵- بررسی اثر زمان

۵۰ میلی‌لیتر محلول نیترات کادمیم (II) با غلظت ۶ ppm و ۶ pH را به ۰/۱ گرم از جاذب نانوفولرن افزوده و در دمای ۳۰۳ کلون و در زمان‌های متفاوت در دستگاه التراسونیک قرار داده و سپس محلول‌ها را سانتریفوژ و از کاغذ صافی گذرانده و نهایتاً جذب آنها توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری می‌شود. نتایج بدست آمده نشان داد که بیشترین درصد حذف یون کادمیم دو ظرفیتی توسط جاذب نانوفولرن در مدت زمان ۹۰ دقیقه صورت گرفته است.

جدول ۶. تاثیر زمان ماندگاری نانوجاذب در برابر یون کادمیم (II).

Time/min	%T	C _e /ppm	%R
۱۰	۰/۱۰۸۰	۳/۶۲	۶۵/۸۳
۲۰	۰/۱۰۴۷	۳/۵۱	۷۰/۸۵
۳۰	۰/۰۹۸۱	۳/۲۹	۸۲/۴۳
۴۰	۰/۰۹۳۷	۳/۱۴	۹۰/۹۸
۶۰	۰/۰۹۳۱	۳/۱۲	۹۲/۰۶
۹۰	۰/۰۹۰۸	۳/۰۴	۹۷/۰۴
۱۲۰	۰/۰۹۲۸	۳/۱۱	۹۲/۶۸
۱۸۰	۰/۰۹۳۱	۳/۱۲	۹۲/۳۵

۳-۶- بررسی اثر غلظت

۵۰ میلی‌لیتر محلول نیترات کادمیم (II) با غلظت‌های متفاوت ولی ۶ pH را به ۰/۱ گرم از جاذب نانوفولرن افزوده و در دمای ۳۰۳ کلون و به مدت زمان ۹۰ دقیقه پس از مجاورت نانوجاذب با یون کادمیم، پس از جداسازی، مقدار جذب یون‌های باقی مانده توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری می‌گردد. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش غلظت درصد جذب کاهش می‌یابد.

مشاهده شد که بیشترین درصد حذف یون کادمیم دو ظرفیتی با استفاده از جاذب نانوفولرن در ۶ pH اتفاق می‌افتد.

جدول ۳. میزان جذب یون کادمیم (II) در pH های مختلف.

pH	%T	C _e /ppm	%R
۲	۰/۰۹۸۷	۳/۳۱	۸۱/۴۶
۳	۰/۰۹۷۰	۳/۲۵	۸۴/۱۰
۴	۰/۰۹۶۱	۳/۲۲	۸۶/۰۸
۵	۰/۰۹۵۵	۳/۲۰	۸۷/۴۰
۶	۰/۰۹۱۳	۳/۰۶	۹۶/۳۷
۶/۵	۰/۰۹۱۳	۳/۰۶	۹۶/۳۷
۷	۰/۰۹۷۹	۳/۲۸	۸۲/۷۲

۳-۳- بررسی اثر مقدار نانوجاذب

۵۰ میلی‌لیتر محلول نیترات کادمیم (II) با غلظت ۶ ppm و ۶ pH را به مقدارهای متفاوت از جاذب نانوفولرن بر حسب گرم افزوده و مطابق مراحل قبل میزان جذب یون کادمیم توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری می‌شود. از نتایج حاصل مشاهده شد که بیشترین درصد حذف یون کادمیم دو ظرفیتی با مقدار ۰/۲ گرم از جاذب نانوفولرن رخ داده که در جدول ۴ قابل رویت است. با توجه به نزدیک بودن راندمان جذب برای مقادیر ۰/۱ گرم جاذب با ۰/۲ و بحث مقرون به صرفه بودن روش، مقدار بهینه نانوجاذب را ۰/۱ گرم در نظر می‌گیریم.

جدول ۴. راندمان جذب یون کادمیم (II) با مقدارهای متفاوت از جاذب نانوفولرن.

m/g	%T	C _e /ppm	%R
۰/۰۲	۰/۱۰۶۳	۳/۶۳	۶۵/۴۲
۰/۰۵	۰/۱۰۶۵	۳/۵۷	۶۸/۰۵
۰/۱	۰/۰۹۱۳	۳/۰۶	۹۶/۳۷
۰/۲	۰/۰۹۰۸	۳/۰۴	۹۷/۰۴
۰/۳	۰/۰۹۰۸	۳/۰۴	۹۷/۰۴

۳-۴- بررسی اثر دما

۵۰ میلی‌لیتر محلول نیترات کادمیم (II) با غلظت ۶ ppm و ۶ pH را به ۰/۱ گرم از جاذب نانوفولرن افزوده و در دماهای متفاوت پس از مجاورت با یون کادمیم و اندازه‌گیری جذب مقدار یون باقی مانده در محیط، نتایج بدست آمده نشان داد که بیشترین درصد حذف یون کادمیم دو ظرفیتی توسط جاذب نانو فولرن در دمای ۳۰۳ کلون اتفاق افتاده است.



نشان دهنده قدرت جذب (mg.g^{-1})، n ثابت تعادل فرنرلیچ که نشان دهنده انرژی پیوندی یون فلز و جاذب، b_T ثابت ایزوترم تمکین، A_T ثابت پیوند تعادل ایزوترم تمکین (l.g^{-1})، R ثابت عمومی گازها، T دمای جذب، q_s میزان اشباع یون جذب شده و K_{ad} ثابت ایزوترم دابینین-رادشکوچ ($\text{mol}^2.\text{kJ}^{-1}$) که متوسط انرژی آزاد E برای واجذب مولکول های جذب شده (kJ.mol^{-1}) $E = \left[\frac{1}{\sqrt{2B_{DR}}} \right]$ و B_{DR}

ثابت هم دمای ایزوترم دابینین-رادشکوچ است.

یکی از پارامترهای مهم در مدل ایزوترم لانگمیر، پارامتر R_L می باشد، که اگر مقدار R_L بزرگتر از یک باشد فرآیند جذب غیرمطلوب و اگر بین یک و صفر باشد فرآیند جذب به صورت مطلوب رخ داده است [۲۳]. چهار احتمال برای مقدار R_L وجود دارد.

i: برای جذب سطحی مطلوب $0 < R_L < 1$ ، ii: برای جذب سطحی نامطلوب $R_L > 1$ ، iii: برای جذب سطحی خطی $R_L = 1$ ، iv: برای جذب سطحی برگشت ناپذیر $R_L = 0$.

معادله همدمای فرنرلیچ هیچگونه پیش بینی در مورد اشباع سطح جاذب با ماده جذب شونده ارائه نمی دهد. بنابراین با این همدمای جذب، ایجاد یک پوشش سطحی نامحدود و جذب چند لایه ای بر سطح قابل پیش بینی است [۲۴]. همدمای تمکین نوعی همدمای جذب سطحی است که اغلب برای جذب سطحی روی سطوح جامد به کار برده می شود. در واقع این نوع همدمای تنوری نیروی الکترواستاتیک بین ملکولی مشتق شده است. همدمای جذب سطحی دابینین-رادشکوچ عمدتاً برای توصیف رفتار جذب فلزات سنگین بر سطح جاذب های طبیعی مورد استفاده قرار می گیرد. E پتانسیل جذب سطحی به دما بستگی دارد ولی باید توجه داشت که تغییر در طبیعت ماده جذب شونده و ماده جاذب نیز باعث تغییر در آن می شود. اندازه گیری این انرژی، با توجه به این نوع تک دمای جذب می توان شاخص مناسبی برای تعیین نوع جذب بدست آورد. به طوریکه اگر انرژی جذب کمتر از 8 kJ.mol^{-1} باشد، جذب را می توان از نوع فیزیکی دانست. در صورتیکه انرژی جذب بین 8 تا 16 kJ.mol^{-1} باشد، نوع جذب را می توان بوسیله ساز و کار تعویض یونی در نظر گرفت و اگر انرژی جذب بیشتر از 16 kJ.mol^{-1} باشد ساز و کار جذب یک ساز و کار شیمیایی قوی تر از تعویض یونی می باشد [۲۵].

۴- نتیجه گیری

جذب سطحی یون کادمیم (II) توسط نانوفولرن در شرایط بهینه $0.1 \text{ گرم جاذب، غلظت یون کادمیم } 6 \text{ ppm، مدت زمان } 90 \text{ دقیقه، pH}=6$ و دمای 303 K بیشترین درصد حذف یون کادمیم (II) را نشان می دهد که معادل 97.04% می باشد. همدمای جذب سطحی یون کادمیم (II) توسط نانوفولرن برتری مدل دابینین-رادشکوچ را با داشتن ماکزیمم رگرسیون ($R^2 = 0.989$)، نسبت به سایر مدل ها است. ماکزیمم ظرفیت جذب با استفاده از مدل لانگمیر برابر با $1/261 \text{ mg.g}^{-1}$ به دست آمده است و مقادیر فاکتور جداسازی در غلظت های متفاوت اولیه، مطلوب بودن فرآیند را نشان داد. با توجه به مقدار انرژی پتانسیل بدست آمده از مدل دابینین-رادشکوچ، جذب یون کادمیم بر روی نانوفولرن C_{60}

جدول ۷. راندمان جذب یون کادمیم (II) در غلظت های مختلف از محلول نیترات کادمیم (II) بر روی $0.1 \text{ گرم نانوفولرن}$ در مدت زمان 90 دقیقه ، $\text{pH}=6$ و دمای 303 کلون .

C_0/ppm	%T	C_e/ppm	$q_e/\text{mg.g}^{-1}$	%R
۲	۰/۰۹۹۸	۱/۱۱۶	۰/۴۷۴	۷۹/۲۵
۴	۰/۰۹۵۸	۲/۱۴۰	۰/۷۵۸	۸۶/۹۱
۶	۰/۰۹۰۸	۳/۰۴۱	۱/۰۷۱	۹۷/۰۴
۸	۰/۰۹۴۳	۴/۲۱۴	۱/۰۷۶	۸۹/۸۳
۱۰	۰/۰۹۷۲	۵/۲۹۲	۱/۱۱۲	۸۸/۹۷

۷-۳- مدل های جذب

برای ارزیابی ایزوترم های جذب یون کبالت بر روی نانوفولرن، غلظت های متفاوت از این یون را در شرایط بهینه: $\text{pH}=6$ ، دما 303 کلون در برابر 0.1 گرم جاذب قرار داده و میزان جذب آن را توسط دستگاه جذب اتمی اندازه گیری می نماییم. جهت تحلیل و ارزیابی ایزوترم های جذب جاذب ها از مدل های لانگمیر [۱۷]، فرنرلیچ که برای جذب روی سطح ناهمگن معتبر است [۱۸]، تمکین به برهمکنش جاذب و جذب شونده مرتبط است و تابع دمای محیط است [۱۹،۲۰] و دابینین-رادشکوچ، بطور کلی به مکانیسم جذب با یک تابع توزیع گوسی بر روی سطوح ناهمگن بیان می شود که بیشتر برای حل شونده های بسیار فعال با غلظت های متوسط سازگار است [۲۱،۲۲] استفاده می شود. برای جذب تک لایه ای روی سطوح با تعداد محدودی از موقعیت های جذب یکسان، بکار می رود. تمامی روابط این مدل ها در جدول ۸ قابل رویت است.

جدول ۸. معادلات ایزوترم بکار رفته در بررسی جذب یون کادمیم توسط نانوفولرن.

مدل	رابطه اصلی	رابطه خطی
لانگمیر	$q = (q_m \cdot K_L \cdot C) / (1 + K_L \cdot C)$ $R_L = \frac{1}{1 + C_0 K_L}$	$q_m = 1/261 \text{ mg.g}^{-1}$ $K_L = 1/552 \text{ L.mg}^{-1}$ $R^2 = 0.989$ $R_L = 0.244$
فرنرلیچ	$q = K C^n$	$n = 2/24$ $K = 0.646 \text{ g.L}^{-1}$ $R^2 = 0.983$
تمکین	$q = \frac{RT}{b_T} \ln(A_T C)$	$b_T = 0.391 \text{ J.mol}^{-1}$ $A_T = 6.705 \text{ L.g}^{-1}$ $R^2 = 0.995$
ایزوترم دابینین-رادشکوچ	$q = q_s \exp(-K_{ad} \varepsilon^2)$ $\varepsilon = RT \ln \left[1 + \frac{1}{C} \right]$ $E = \frac{1}{\sqrt{2\beta}}$	$\beta = 10^{-8} \text{ mol}^2.\text{kJ}^2$ $q_m = 1/261 \text{ mg.g}^{-1}$ $E = 2/233 \text{ kJ.mol}^{-1}$ $R^2 = 0.989$

که در روابط فوق، q میزان یون جذب شده توسط جاذب (mg.g^{-1})، C_0 ، C غلظت باقیمانده و اولیه فلز در محلول (mg.l^{-1})، K_L ثابت تعادل لانگمیر وابسته به انرژی جذب (l.mg^{-1})، q_m میزان یون فلز مورد نیاز برای تشکیل یک لایه (mg.g^{-1})، K ثابت ایزوترم فرنرلیچ که

20. C, Aharoni; M, Ungarish; J. Chem. Soc. Faraday Trans. 73: 456-464, (1977).
21. A, Gunay; E, Arslankaya; I, Tosun; J. Hazard. Mater. 146: 362-371, (2007).
22. A, Dabrowski; Adv. Colloid Interface Sci. 93: 135-224, (2001).
23. A.O, Dada; A.P, Olalekan; A.M, Olatunya; O, Dada; Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich, IOSR Journal of Applied Chemistry. 3: 38-45, (2012).
24. V, Vimonses; S, Lei; B, Jin; C.W.K, Chow; C, Saint; Chemical Engineering Journal. 148: 354-364, 2009.
25. R, Sakurovs; S, Day; S, Weir; G, Duffy; Energy Fuels. 2(2): 992-997, 2007.

فیزیکی می‌باشد که می‌توان با استفاده از افزایش دما یون جذب شده را پس از تصفیه ساب، جدا نمود و نانوجاذب را بازیافت و مجدد به پروسه حذف آلاینده از پساب برگرداند، داده‌های جدول ۵ نشان می‌دهد با افزایش دما، راندمان حذف آلاینده کاهش می‌یابد که مصداقی بر این مطلب است.

۵- منابع

1. U, Kumar; M, Bandypadhyay; Bioriesource Technology. 97: 104-109, (2006).
2. M, M, Radhi; M, R, Jobayr; E, M, Taqi Salman; T, W, Tee; Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 6(9): 357-363, (2012).
3. I, Mobasherpour; E, Salahi; M, Pazouki; Arabian Journal of Chemistry. 5(4): 439-446, (2012).
4. Q, Wei; B, Juanjuan; T, Longlong; L, Zhan; L, Peng; and W, Wangsu; BioMed Research International. 463161, 8, (2014).
5. M.S.M, Li; F.P, Filice; J.D, Henderson; and Z, Ding. J. Phys. Chem. C. 120 (11): 6094-6103, (2016).
6. B.H, Devmunde; A.V, Raut; S.D, Birajdar; S.J, Shukla; D.R, Shengule; and K.M, Jadhav Journal of Nanoparticles. Article ID 4709687, 8, (2016).
7. S.S, Rahangdale; Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 4(11): 4830-4835, (2012).
8. M.C.D, Khabibi and I, Ulumudin; OP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 172: 012-032, (2017).
9. M.M, Radhi; W.T, Tan; M.Z.B Ab Rahman; A.B, Kassim; Int. J. Electrochem. Sci., 5: 254-266, (2010).
10. T, Nakagawa; K, Kokubo; H, Moriwaki; Journal of Environmental Chemical Engineering. 2: 1191-1198, (2014).
11. P, Tan; J, Wen; Y, Hu and X, Tan; RSC Adv. 6: 79641-79650, (2016).
12. L, Mahdavian; Russian Journal of Applied Chemistry. 89(9): 1528-1535, (2016).
13. L.A, Rochford; T.S, Jones; and C.B, Nielsen; J. Phys. Chem. Lett. 7(17): 3487-3490, (2016).
14. D, Zhao; J, Ning; S, Li; M, Zuo Journal of Nanomaterials. 2016: Article ID 5923975, 7, (2016).
15. R, Valizadeh; L, Mahdavian; Int J Phytoremediation. 18(4): 329-36, (2016).
16. A, Almasi Nahnaji; L, Mahdavian; Environmental Health Engineering. 3(2): 129-142, (2016).
17. I, Langmuir; Journal American Chemical Society. 38: 2221-2295, (1916).
18. H.M.F, freundlich; übe, 57: 385-470, (1906).
19. M.I, Tempkin; V, Pyzhev; Acta Phys. Chim. USSR. 12: 327-356, (1940).