

## بررسی کارایی نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی پوشش داده شده با سیلیس در حذف مواد آلی طبیعی از آب

الهه کریمی پسندیده<sup>۱</sup>، روشنگر رضائی کلانتری<sup>۲\*</sup>، سیمین ناصری<sup>۳</sup>، امیرحسین محوی<sup>۴</sup>، رامین نبی زاده<sup>۵</sup>، علی اسرافیلی<sup>۶</sup>

دریافت: ۹۲/۰۵/۱۵ پذیرش: ۹۲/۰۸/۱۲

### چکیده

**زمینه و هدف:** حضور مواد آلی طبیعی (NOM) بر روی کیفیت آب مانند رنگ، بو و مزه تاثیر می‌گذارد، حضور این مواد در آب باعث گرفتگی فیلترها و غشاهای و در نتیجه کاهش راندمان فرایندهای تصفیه پیشرفته آب می‌شود، همچنین به علت واکنش با ضد عفونی کننده‌ها و تولید محصولات جانبی برای سلامتی انسان مضر است. نانوذرات اکسید آهن به عنوان یک جاذب موثر برای حذف آلاینده‌ها از محیط آبی مطرح هستند. در این تحقیق به منظور افزایش پایداری و پراکندگی بیشتر این نانوذرات از پوشش سیلیس استفاده شد و توانایی آن در جذب اسید هیومیک از آب مورد بررسی گرفت.

**روش بررسی:** نانوذرات اکسید آهن به روش هم‌ترسیبی تهیه شد، سپس با افزودن ترا اتوکسی سیلان نانوذرات حاصله با سیلیس پوشش داده شدند. مشخصات فیزیکی آنها توسط میکروسکوپ الکترونی و دستگاه پراش اشعه X تعیین گردید. در مرحله بعد آزمایشات جذب شامل تعیین pH و زمان تماس بهینه در محدوده ۱۲-۳ و ۲۴۰-۵ min انجام شد، سینتیک جذب با توجه به زمان‌های مختلف جذب اسید هیومیک تعیین شد، سپس با استفاده از نتایج تاثیر غلظت‌های مختلف جاذب، غلظت‌های مختلف اسید هیومیک، ایزوترم‌های فروندلیچ و لانگمیر تعیین شدند. **یافته‌ها:** بررسی مورفولوژی سطح جاذب نشان داد که نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس دارای اندازه حدود ۳۰-۱۳۰ nm بود. pH معادل ۱۰/۵، و زمان تماس ۹۰ min به عنوان شرایط بهینه برای حذف اسید هیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس بود. و حداکثر ظرفیت جذب اسید هیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده با سیلیس ۱۹۲/۳۰ بوده است. بررسی روابط ایزوترم حاصل از تاثیر غلظت‌های مختلف جاذب بر غلظت‌های مختلف اسید هیومیک نشان داد حذف اسید هیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس از مدل لانگمیر ( $R^2 > 0/90$ ) و سینتیک آن از مدل شبه درجه دوم ( $R^2 > 0/98$ ) پیروی می‌کند.

**نتیجه‌گیری:** نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس به علت داشتن جایگاه‌های جذب فراوان، خاصیت مغناطیسی و قابلیت جداسازی توسط آهنربا، و تولید ارزان قیمت می‌تواند به عنوان یک جاذب کارآمد در حذف اسید هیومیک از آب آشامیدنی به کار رود.

**واژگان کلیدی:** اسید هیومیک، جذب، نانوذره اکسید آهن، پوشش دادن، مواد آلی طبیعی

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران

۲- (نویسنده مسئول): دکترای عمران محیط زیست، دانشیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران

۳- دکترای شیمی آب، استاد دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران

۴- دکترای بهداشت محیط، استادیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران

۵- دکترای بهداشت محیط، دانشیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران

۶- دکترای شیمی، استادیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران

## مقدمه

حضور مواد آلی طبیعی (Natural organic matter) در آب یکی از مسائل بسیار مهم است. این مواد بر کیفیت آب تاثیر می گذارند، و همواره به عنوان یکی از موارد مساله ساز در تصفیه خانه های آب شهری مطرح بوده اند (۱). مواد آلی طبیعی مخلوط غیریکنواختی از ترکیبات آلی هستند، که از تجزیه گیاهان، حیوانات، و به طور کلی موجودات زنده وارد آب می شوند، و در همه محیط های آبی وجود دارند (۲). حضور این ترکیبات روی کیفیت آب مانند رنگ، طعم و بو تاثیر می گذارد. کنترل این ترکیبات به دلیل ایجاد فرآورده های جانبی گندزدایی، نظیر تری هالومتان ها که اغلب سرطان زا هستند ضروری است (۳، ۴). اسید هیومیک ۶۰ تا ۹۰ درصد ترکیبات آلی طبیعی را تشکیل می دهد (۵). ترکیبات آلی طبیعی از نظر واکنش پذیری، ساختار و رنگ متفاوت هستند (۶). این مواد به واسطه واکنش با کلر و تشکیل فرآورده های جانبی گندزدایی اهمیت ویژه ای یافته اند (۷). حضور این مواد در آب و واکنش با ضد عفونی کننده ها و تولید محصولات جانبی سبب کاهش اثر گندزداها بر میکروارگانیسم ها می گردد. مواد آلی طبیعی با بسیاری از آلاینده های آلی و معدنی واکنش داده و ممکن است سمیت آنها را در آب تغییر دهند (۸). همچنین به عنوان مواد غذایی برای باکتری ها در سیستم توزیع آب آشامیدنی استفاده می شوند. و سبب رشد مجدد میکروارگانیسم ها در شبکه توزیع آب می گردند (۹، ۱۰). با توجه به نیاز روزافزون به آب سالم، و کمبود منابع آب شرب، اعمال قوانین سخت گیرانه گندزدایی مبتنی بر کنترل تری هالومتان ها و هالواستیک اسیدها (حدود  $80 \mu\text{g/L}$  و  $60$ )، ضرورت استفاده از فناوری های جدید برای تصفیه آب را روشن می سازد (۳).

حذف ترکیبات آلی طبیعی از محیط های آبی به طور گسترده ای بررسی شده است. متداول ترین روش ها برای حذف این نوع ترکیبات شامل ازناسیون (۱۱)، و سایر روش های اکسیداسیون پیشرفته (۱۰، ۱۲، ۱۳)، انعقاد (۱۳، ۱۴)، تبادل یون (۱۵)، تجزیه زیستی (۱۶)، استفاده از غشاها (۱۷، ۱۸) و جذب است (۱۹). هزینه بالا در فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته و غشاها، نیاز به استفاده از مقدار زیاد مواد منعقدکننده و تولید مقدار زیاد لجن در فرایند انعقاد جهت حذف اسید هیومیک، و راندمان

پایین حذف در تجزیه زیستی از جمله معایب استفاده از روش های فوق است (۷، ۲۰). از بین روش های ذکر شده فرایند جذب بیشترین کاربرد را دارد (۲۱). محدوده وسیعی از جاذب ها همچون: کربن فعال (۶)، هیدروکسید فیریک گرانوله، مواد معدنی طبیعی، اکسیدهای آهن (۱۲) و برخی از نانوذرات پیشرفته همچون نانوتیوب های کربن جهت حذف بررسی شده است (۱۹، ۲۲). Naghizadeh و همکاران (۲۰۱۳) آزمایشات پیوسته جذب را در یک ستون جذب جهت بررسی راندمان کربن نانوتیوب ها برای حذف مواد آلی طبیعی اجرا کردند، نتایج آزمایشات نشان داد که با افزایش مقدار کربن نانوتیوب، زمان نقطه شکست دیرتر اتفاق افتاد و حجم آب تصفیه شده افزایش یافت (۲۳). در سال های اخیر، ذرات مغناطیسی به علت خاصیت مغناطیسی و جداسازی آنها توسط آهنربا، تعداد زیاد جایگاه های فعال جذب روی سطح، راندمان بالای حذف آلاینده، به عنوان یک جاذب مورد توجه قرار گرفته اند (۲۴، ۲۵). در این میان نانوذرات اکسید آهن به عنوان یک جاذب موثر برای حذف آلاینده ها از محیط آبی شناخته شده اند، و در بسیاری از موارد برای حذف آلاینده های آلی و فلزات سنگین از محیط های آبی استفاده شده اند (۲۶-۲۸).

Absalan و همکاران (۲۰۱۱)، حذف رنگ قرمز راکتو را از محیط آبی به وسیله نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با سورفاکتانت بررسی کردند، نتایج آزمایشات نشان داد، بیش از ۹۸٪ از رنگ با این روش حذف شد (۲۹). Shen و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه ای حذف یون های نیکل، مس، کادمیوم و کروم را به وسیله نانوذرات اکسید آهن بررسی کردند، نتایج آزمایشات نشان داد بیش از ۹۰٪ از یون های مطالعه شده توسط این روش حذف شدند (۳۰).

در فرایند جذب ویژگی های سطح نانوذره بسیار مهم است. بنابراین اصلاح سطح نانوذرات برای افزایش راندمان حذف بررسی شده است (۳۱). تحقیقات نشان داده است که، نانوذرات با سطح اصلاح شده و هسته مغناطیسی توانایی بالایی در حذف فلزات سنگین، و سایر آلاینده های آلی همچون فنل را از محیط های آبی دارند (۲۶، ۲۷، ۳۲).

روش های متعددی مثل پوشش دادن اکسید آهن با طلا، پلیمر

مطالعات جذب در چند بخش: تأثیر pH، زمان تماس، و تعیین ایزوترم‌های جذب، بر فرایند حذف مواد آلی طبیعی در سیستم بسته مورد بررسی قرار گرفت.

#### تعیین pH بهینه حذف اسیدهیومیک:

با استفاده از محلول اسیدهیومیک تهیه شده (۱۰۰۰ mg/L) مقدار ۵۰ mL اسید هیومیک با غلظت ۱۰ mg/L در ارلن‌های ۱۰۰ mL ریخته شد، و pH آنها با استفاده از NaOH و HCl بر روی (۳-۷-۹-۱۱) تنظیم گردید. سپس جاذب با غلظت ۵۰۰ mg/L به هریک از ارلن‌ها اضافه شد و به مدت ۱۰۰ min روی شیکر با سرعت ۲۲۰ rpm قرار گرفت. پس از آن به منظور جداسازی نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس از اسیدهیومیک ارلن‌ها روی آهن‌ها قرار گرفتند. سپس از بخش رویی مایع نمونه‌برداری شد و غلظت باقیمانده اسید هیومیک در آن با دستگاه اسپکتروفتومتر UV visible (طیف ماوراءبنفش در طول موج ۲۵۴ nm) تعیین شد. با توجه به نتایج حاصله از این مرحله برای تعیین مقدار دقیق‌تر pH بهینه، مراحل فوق با pH های (۷/۵-۹/۵-۱۰/۵ و ۱۲) تکرار شد.

#### تعیین سینتیک فرایند جذب:

برای تعیین زمان بهینه از اسیدهیومیک با غلظت ۱۰ mg/L، جاذب با غلظت ۵۰۰ mg/L و pH بهینه از مرحله قبل برای انجام فرایند جذب استفاده شد. و سپس در زمان های ۵، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ min غلظت اسید هیومیک باقی مانده در محلول با روش قبلی سنجش شد. برای توصیف سینتیک جذب اسید هیومیک بر روی نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس، مدل های سینتیک شبه درجه اول (معادله ۱)، و دوم (معادله ۲) مورد استفاده قرار گرفت:

معادله خطی سینتیک درجه اول عبارتست از (۸):

$$\ln(q_e - q_t) = h \cdot q_e - k_1 t \quad (1)$$

در اینجا  $q_e$  و  $q_t$  به ترتیب ظرفیت جذب در زمان تعادل و زمان  $t$  (mg/g) و  $K_1$  ضریب سرعت ( $\text{min}^{-1}$ ) است. مقادیر  $q_e$ ،  $K_1$  به ترتیب از عرض از مبدا و شیب نمودار خطی  $\ln(q_e - q_t)$  در مقابل  $t$  محاسبه می‌شوند.

و سیلیکا (۳۳) برای اصلاح سطح نانوذرات اکسید آهن استفاده شده است، در این بین سیلیس پرکاربردترین ماده برای پوشش است (۳۲)، زیرا ترکیب آن از نظر شیمیایی پایدار است و مانع از اکسید شدن نانوذره آهن و پراکنده شدن نانوذرات اکسید آهن در محلول می‌شود (۳۱). بنابراین با توجه به مطالعات قبلی، در این تحقیق، سطح نانوذرات اکسید آهن با سیلیس پوشانده شد. و هدف از این پژوهش تهیه نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی پوشش داده شده با سیلیس و بررسی کارایی آن در حذف مواد آلی طبیعی از آب است.

#### مواد و روش‌ها

##### آماده‌سازی نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس:

نانوذرات اکسید آهن به روش هم‌ترسیبی تهیه شد. در ابتدا ۴ g کلرید آهن  $\text{FeCl}_3$  و ۲ g کلرید آهن  $\text{FeCl}_2$  به همراه ۲۰۰ mL آب مقطر تحت دمای  $80^\circ\text{C}$  و در حضور گاز نیتروژن با سرعت ۳۰۰۰ rpm به مدت ۳۰ min با هم مخلوط شدند. سپس آمونیاک به آن اضافه شد، در این مرحله رنگ محلول از قهوه‌ای تیره به سیاه تغییر یافت. و پس از ۱۰ min هم زدن نانوذرات اکسید آهن تولید شد (۳۴). در مرحله بعد نانوذرات تهیه شده با ۴ mL آمونیاک، ۷/۵ mL آب مقطر و ۸۰ mL اتانول به مدت ۲ h تحت دمای  $40^\circ\text{C}$  با هم مخلوط شدند، در حین اختلاط ۱ mL تترائتوکسی سیلان به سوسپانسیون درون محفظه اضافه شد. بعد از اتمام زمان اختلاط، مخلوط به مدت ۱ h در دستگاه اولتراسونیک (Elma(D-۷۸۲۲۴ singel/Htw)Pv۵۰W) یکنواخت شد. نهایتاً جاذب به وسیله آهن‌ها جداسازی شد، و چندین بار با اتانول شسته شد، و به مدت ۶ h در حمام بخار در دمای  $60^\circ\text{C}$  قرار داده شد، و در اتانول نگهداری شد. برای تعیین مشخصات نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس آزمایشات SEM و XRF به وسیله دستگاه (scanning electron microscop) با بزرگنمایی ۲۰۰۰۰ برابر بر روی آن صورت گرفت (۳۴).

##### روش اجرای مطالعه:

پس از آماده‌سازی نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس و تهیه محلول استوک اسید هیومیک با غلظت ۱۰۰۰ mg/L

معادله خطی سینتیک درجه دوم عبارتست از (۸)

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

$q_e$  و  $q_t$  مشابه معادله اول است. در معادله (۲)  $k_2$  ثابت واکنش شبه درجه دوم بر حسب (mg/g)/min است. مقادیر  $q_e$  و  $k_2$  می‌توانند به ترتیب از شیب و عرض از مبدا نمودار خطی  $t/q_t$  در مقابل  $t$  تعیین شوند.

تعیین ایزوترم جذب اسید هیومیک:

با توجه به زمان تماس و pH بهینه از مرحله های قبلی از نه غلظت اسید هیومیک ۱، ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ mg/L و سه دز جذب با غلظت‌ها ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ mg/L ایزوترم جذب تعیین شد.

در این پژوهش از مدل ریاضی ایزوترم فروندلیچ و لانگمیر برای توصیف مدل جذب اسید هیومیک استفاده شد.

مدل ایزوترم فروندلیچ:

معادله ۳ نشان‌دهنده مدل ریاضی ایزوترم فروندلیچ است (۲۹).

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (3)$$

$q_e$ : مقدار ماده جذب شده به ازاء واحد وزن جاذب (mg/g)

$C_e$ : غلظت تعادلی ماده در محلول (mg/L)

$k, n$ : ثابت‌های فروندلیچ هستند.

معادله خطی ایزوترم فروندلیچ به شکل زیر است:

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (4)$$

مدل ایزوترم لانگمیر:

مدل ریاضی این ایزوترم در معادله ۵ نشان داده است (۳۵).

$$q_e = \frac{q_{bc} K_l C_e}{1 + K_l C_e} \quad (5)$$

$q_{bc}$ : حداکثر ظرفیت جذب (mg/g)

$K_l$ : ثابت لانگمیر (L/mg)

پارامترهای  $q_e$  و  $C_e$  مشابه ایزوترم فروندلیچ هستند.

مدل خطی ایزوترم لانگمیر به صورت معادله ۶ است:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_l q_{bc}} + \frac{1}{q_{bc}} \quad (6)$$

برای تعیین pH و زمان تماس بهینه از روش فاکتور در زمان استفاده شد، که با در نظر گرفتن pH ۹ متفاوت و ۸ زمان، ۱۷ آزمایش در این مرحله انجام شد، برای تعیین ایزوترم‌های جذب از روش فاکتوریل کامل با استفاده از ۳ غلظت جاذب و ۹ غلظت آلاینده، ۲۷ آزمایش انجام شد، تمام آزمایشات به صورت سه بار تکرار مورد بررسی قرار گرفتند و برای ارائه نتایج و آنالیز آماری داده‌ها از آنالیز واریانس و نرم افزار Mini Tap و برای رسم نمودار از نرم افزار Excel استفاده شد.

## یافته‌ها

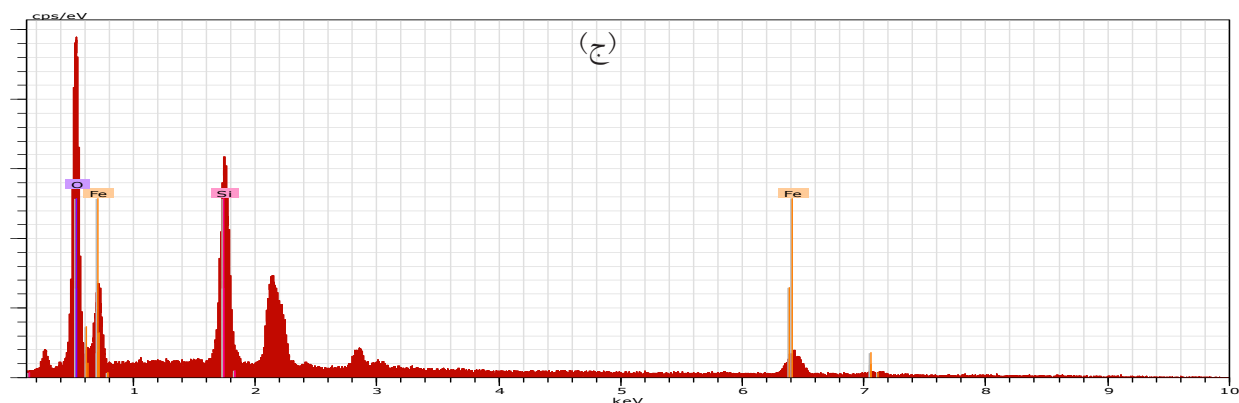
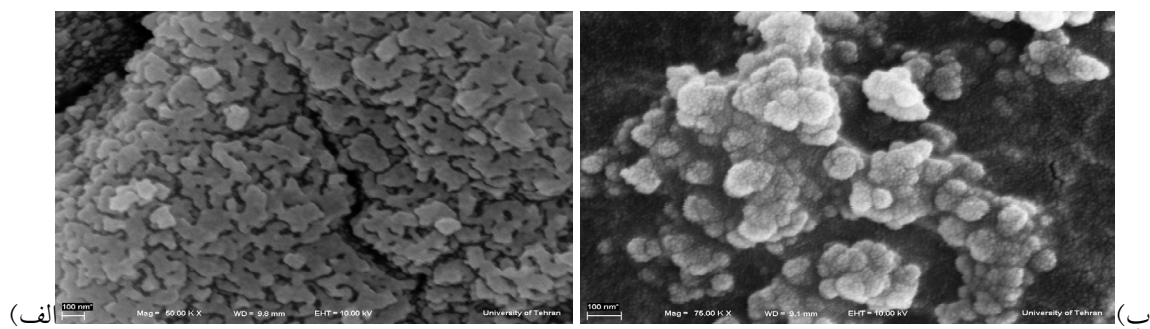
نتایج مشخصات فیزیکی نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس

شکل الف و ب به ترتیب تصاویر SEM نانوذرات اکسید آهن و پوشش داده شده با سیلیس را نشان می‌دهد، باتوجه به شکل مشخص می‌شود که سطح نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس به شکل یکنواخت نیست همچنین این نانوذرات شبه کروی با اندازه نزدیک به ۱۳۰-۳۰ nm است، در صورتی که این سطح در نانوذرات خام نسبتاً یکنواخت است، و در شکل ۱ (ج) تصویر XRF نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس نشان داده شده، که درصد وزنی هر یک از عناصر تشکیل‌دهنده جاذب به ترتیب آهن، اکسیژن و سیلیس معادل ۵۶،۲۶ و ۱۸ درصدوزنی است.

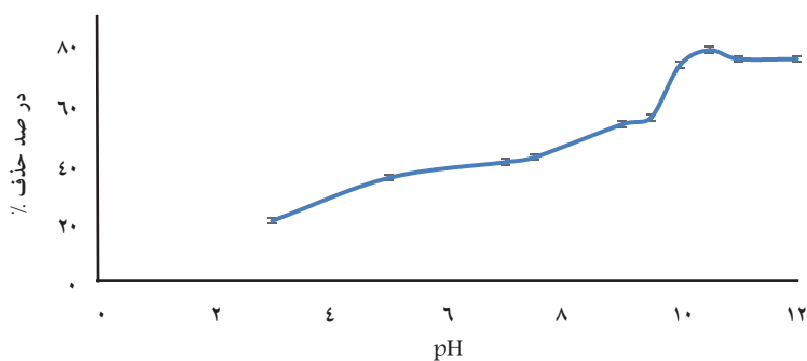
نتایج pH بهینه حذف اسید هیومیک توسط نانوذرات

اکسید آهن پوشش داده با سیلیس

نتایج مرحله تعیین pH بهینه حذف در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به اینکه با افزایش pH از ۳ به ۱۱ راندمان حذف افزایش یافت و ممکن بود این روند ادامه یابد، لذا در محدوده pH هایی که راندمان بیشتری دارند از pH های میانی و نهایتاً ۱۲ استفاده شد، نتایج حاصل از pH ۱۰، ۱۰/۵ و ۱۱ با اختلاف جزئی بیشتری حذف را نشان داد، بنابراین pH ۱۰ تا ۱۱ به عنوان محدوده مناسب برای عملکرد بهتر در نظر گرفته شد. در این راستا برای ادامه آزمایشات از pH ۱۰/۵ استفاده شد.



شکل ۱: تصاویر SEM مربوط به نانوذرات اکسید آهن (الف) و نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس با بزرگنمایی ۲۰۰۰۰ برابر (ب) تصویر XRF نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس (ج)



شکل ۲- بازده حذف اسید هیومیک در pH های مختلف، غلظت اولیه اسید هیومیک ۱۰ mg/L، غلظت جاذب (۵۰۰ mg/L) و زمان ۱۰۰ min

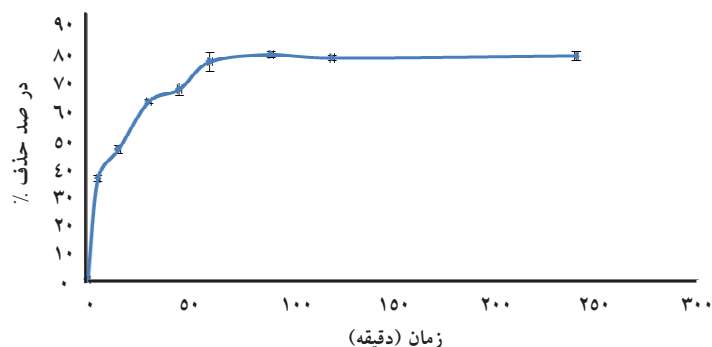
نرخ حذف اسید هیومیک در طی ۹۰ min اول بوده است و پس از آن نرخ حذف کاهش یافت. بیشترین بازده حذف اسید هیومیک با نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس در زمان تماس ۹۰ min در pH معادل ۱۰/۵ به میزان ۷۸

نتایج زمان تماس و سینتیک حذف اسید هیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده با سیلیس  
میزان حذف اسید هیومیک در طی زمان در شکل ۳ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می گردد بیشترین

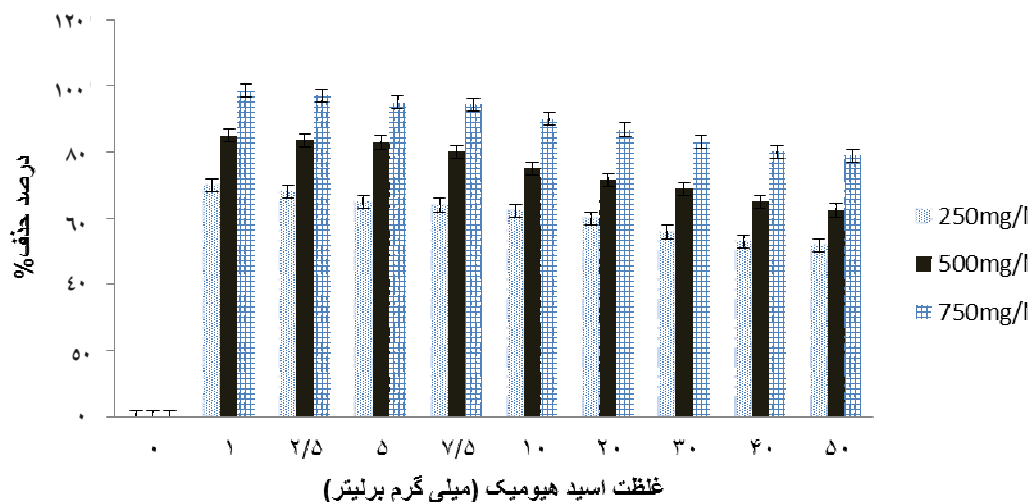
نتایج ایزوترم‌های جذب اسید هیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده با سیلیس

نتایج حاصل از رابطه بین تغییرات غلظت اسید هیومیک و تغییر دز جاذب در pH و زمان تماس بهینه در شکل ۴ نشان داده شده است. با استفاده از نتایج حاصل از تاثیر غلظت‌های مختلف

درصد حاصل شد. با توجه به مقادیر حذف در زمان‌های تماس ذکر شده، سینتیک‌های درجه اول و دوم فرایند جذب محاسبه شد و نتایج محاسبات پارامترهای سینتیکی جذب اسید هیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۳: بازده حذف اسید هیومیک در زمان‌های مختلف، pH ۵/۱، غلظت اولیه اسید هیومیک ۱۰ mg/L و غلظت جاذب (۵۰۰ mg/L)



شکل ۴: تاثیر غلظت‌های مختلف نانوذرات اکسید آهن پوشش داده با سیلیس بر غلظت‌های مختلف اسید هیومیک در pH ۵/۱ و زمان ۹۰ min

جدول ۱- پارامترهای سینتیکی جذب اسید هیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده با سیلیس

| شبه درجه دوم |       |        | شبه درجه اول |       |        | غلظت جاذب (mg/L) |
|--------------|-------|--------|--------------|-------|--------|------------------|
| $q_e$        | $k_2$ | $R^2$  | $k_1$        | $q_e$ | $R^2$  |                  |
| ۲۷/۰۲        | ۰/۰۰۳ | ۰/۹۸۳۴ | ۰/۰۳۶۸       | ۱۸/۰۶ | ۰/۹۸۹۴ | ۲۵۰              |
| ۱۴/۹۹        | ۰/۰۰۹ | ۰/۹۸۹۷ | ۰/۰۳۵۹       | ۹/۷۰۹ | ۰/۹۸۷۱ | ۵۰۰              |
| ۱۱/۶۲        | ۰/۰۱  | ۰/۹۸۴۲ | ۰/۰۳۹۳       | ۷/۷۲  | ۰/۹۹۱۹ | ۷۵۰              |

پوشش داده شده با سیلیس تعیین شد، و در جدول ۲ نشان داده شده است.

جاذب بر غلظت‌های مختلف اسیدهیومیک، پارامترهای ایزوترم‌های جذب اسید هیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن

جدول ۲: ضرایب مدل‌های ایزوترم جذب اسیدهیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده با سیلیس

| غلظت $Fe_3O_4/SiO_2$ (mg/L) |       |        |       |                        |       |      |        |
|-----------------------------|-------|--------|-------|------------------------|-------|------|--------|
| ضرایب ایزوترم لانگمیر       |       |        |       | ضرایب ایزوترم فروندلیچ |       |      |        |
| $R^2$                       | $K_L$ | $q_0$  | $R_L$ | $R^2$                  | $K_f$ | n    | $R^2$  |
| ۰/۹۴۴۲                      | ۰/۰۴  | ۱۹۲/۳۰ | ۰/۷   | ۰/۸۳۱                  | ۵/۴۵  | ۱/۰۵ | ۰/۸۳۱  |
| ۰/۹۳۹۲                      | ۰/۱   | ۸۸/۵۰  | ۰/۵   | ۰/۷۹۵۱                 | ۶/۰۵  | ۱/۲۳ | ۰/۷۹۵۱ |
| ۰/۹۰۶۸                      | ۰/۴   | ۵۷/۱۴  | ۰/۲   | ۰/۹۹۵۵                 | ۱۳/۱  | ۱/۸۲ | ۰/۹۹۵۵ |

## بحث

### مشخصات فیزیکی جاذب‌ها

برای تعیین مورفولوژی سطح نانوذرات آهن پوشیده شده با سیلیس از آزمایش SEM با بزرگنمایی ۲۰۰۰۰ برابر استفاده شده است. تصویر SEM نشان داد که سطح نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس یکنواخت نیست و سطحی دارای خلل و فرج بسیار با ذراتی شبه کروی با قطر حدود ۱۳۰-۳۰ nm دارد.

تصویر X-ray تهیه شده از جاذب، حضور ذرات  $SiO_2, Fe$  را در جاذب تایید کرد.

Zao و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه‌ای تهیه نانوذرات مغناطیسی پوشش داده با سیلیس و سورفاکتانت را بررسی کرد، تصویر SEM حضور سطحی متخلخل با اندازه ذرات حدود ۵۰ nm را نشان داد (۳۲).

### تأثیر pH بر حذف اسید هیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده با سیلیس

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شد، تغییرات pH در راندمان حذف بسیار موثر است، به گونه‌ای که از pH ۷ به بالا راندمان حذف اسیدهیومیک افزایش یافت و بیشترین میزان حذف اسیدهیومیک در محدوده pH ۱۱-۱۰ رخ داده است. pH بهینه در حذف اسیدهیومیک توسط فرایند جذب به نوع جاذب و آلاینده بستگی دارد.

در تحقیقی توسط Wang و همکاران (۲۰۱۱) جذب NOM روی نانوذرات آهن مغناطیسی اصلاح شده با سورفاکتانت بررسی شد، نتایج نشان داد که حذف NOM در محدوده pH ۶-۹ بیشتر بوده است، اما در pH ۵ به میزان قابل توجهی کاهش یافت (۹). Rao و همکاران (۲۰۱۱) جذب اسید هیومیک را روی هیدروژل کاتیونی مغناطیسی بررسی کردند، نتایج حاکی از آن بود که کاهش pH تأثیر نامطلوبی بر روی حذف اسیدهیومیک دارد و با میزان کمی اختلاف در راندمان حذف در pH برابر ۷ و ۹ بیشترین میزان حذف در pH برابر ۷ اتفاق افتاد (۲). در تحقیقی که توسط Zhan و همکاران در سال ۲۰۱۱ بر روی حذف اسیدهیومیک با زئولیت‌های اصلاح شده با سورفاکتانت CPB و HDTMA انجام شد، نشان داده شد که بیشترین حذف اسیدهیومیک در pH‌های قلیایی است.

مواد آلی طبیعی از دو بخش آبدوست و آبگریز تشکیل شده‌اند، در جذب این مواد توسط نانوذرات آهن دو مکانیسم وجود دارد:

- جذب بخش هیدروفوبیک مواد آلی طبیعی توسط نانوذره -واکنش گروه‌های هیدروژنی
- در pH بیشتر از ۷ هر دو مکانیسم فعال هستند، بنابراین راندمان

نتایج نشان داد، که سینتیک جذب اسیدهیومیک توسط زئولیت اصلاح شده باستیل پری دینیوم بروماید از مدل شبه درجه دوم پیروی کرد (۳۶).

#### ایزوترم‌های جذب

بازده حذف اسیدهیومیک به موازات افزایش غلظت اسیدهیومیک ورودی برای هر سه غلظت جاذب کاهش یافت، که مشابه سایر مطالعات انجام شده است (۳۷، ۳۸). همچنین با افزایش غلظت جاذب، ظرفیت جذب کاهش یافت، که به دلیل اشغال شدن جایگاه‌های جذب است. معمولاً حداکثر ظرفیت جذب به هنگام تکمیل جایگاه‌های فعال جذب بوده که کمترین مقدار از جاذب برای بیشترین غلظت آلاینده روی می‌دهد (۳۹).

Wang و همکاران (۲۰۱۱) حذف مواد آلی طبیعی را به وسیله نانوذرات اکسید آهن پوشش داده با سورفکتانت بررسی کردند، در این تحقیق از ۳ غلظت جاذب ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ mg/L و ۱ غلظت آلاینده ۲۰ mg/L استفاده کردند، نتایج آزمایشات نشان داد که بازده حذف آلاینده به موازات افزایش غلظت جاذب افزایش و ظرفیت جذب کاهش یافت (۹).

نتایج ضرایب و معادلات ایزوترم لانگمیر و فروندلیچ در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به ضریب همبستگی برای هر سه غلظت جاذب می‌توان نتیجه گرفت که جذب از مدل لانگمیر پیروی می‌کند ( $R_2 > 0.9$ ) مقدار ضرایب  $R^2$  در ایزوترم لانگمیر کمتر از ۱ بود. با توجه به اینکه در ایزوترم لانگمیر مقادیر  $0 < R_1 < 1$  بیانگر مطلوبیت جذب است، می‌توان نتیجه گرفت که جذب اسیدهیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس مطلوب است (۸). همچنین در این تحقیق میزان  $n$  در محدوده ۱۰-۱ است که نشان‌دهنده جذب مؤثر اسیدهیومیک در غلظت‌های مختلف جاذب است (۸).

در تحقیقی که توسط Zhan و همکاران جذب اسیدهیومیک به وسیله زئولیت اصلاح شده با ستیل پری دینیوم بروماید بررسی شد، مقادیر  $q_0$  و  $k_1$  به ترتیب معادل ۴۲/۵، ۲۳/۵ بود. و ایزوترم جذب اسیدهیومیک توسط زئولیت اصلاح شده با ستیل پری دینیوم بروماید از مدل لانگمیر پیروی کرد (۳۶).

Harton و همکاران (۲۰۰۹) حذف اسیدهیومیک را به وسیله اکسیدگرافیت بررسی کردند، نتایج نشان داد که مقدار  $q_0$  معادل

حذف افزایش می‌یابد. اما در pHهای کمتر از ۷ این واکنش‌ها خنثی هستند. بنابراین کمترین میزان حذف اسیدهیومیک در pH ۳ اتفاق افتاد (۹).

#### تأثیر زمان تماس و سینتیک جذب اسیدهیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده با سیلیس

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شد، میزان جذب اسیدهیومیک با افزایش زمان تماس، افزایش یافت. و بیشترین میزان حذف اسید هیومیک در طی ۹۰ min اول صورت گرفت.

در تحقیقی که توسط Rao و همکاران (۲۰۱۱) بر روی جذب اسیدهیومیک توسط هیدروژل کاتیونی انجام شد، بیش از ۹۰٪ از اسیدهیومیک در ۲۰۰ min اول جذب شد (۲). Zan و همکاران (۲۰۱۰) جذب اسیدهیومیک را روی زئولیت اصلاح شده با ستیل پری دینیوم بروماید بررسی کردند نتایج نشان داد، که ماکزیمم حذف اسیدهیومیک در زمان ۵۰۰ min حاصل شد (۳۶).

جذب اسید هیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس شامل دو مرحله است:

مرحله اول- پراکنش اسید هیومیک در خلل و فرج جاذب.  
مرحله دوم- جذب اسیدهیومیک توسط جایگاه‌های فعال جاذب.

در ابتدا سرعت جذب اسیدهیومیک بالا بود و این تا زمانی که جایگاه‌های جذب اشغال شوند، ادامه یافت به طوری که بیشترین سرعت جذب در طی ۹۰ min اول رخ داد سپس سرعت جذب به موازات اشغال شدن جایگاه‌های جذب کاهش و نهایتاً ثابت شد (۸). عدم تغییرات اساسی در میزان جذب بعد از زمان ۹۰ min توسط نانوذرات آهن می‌تواند به دلیل اشغال جایگاه‌های فعال جاذب، و یا بازجذب اسیدهیومیک باشد، ضمن اینکه بعد از رسیدن به زمان تعادل سرعت بازجذب با سرعت جذب برابر شده و تغییری در راندمان حذف صورت نمی‌گیرد (۳۲).

Rao و همکاران (۲۰۱۱) جذب اسیدهیومیک را توسط هیدروژل کاتیونی بررسی کردند، با توجه به نتایج حاصله سینتیک جذب اسیدهیومیک از مدل شبه درجه دوم پیروی کرد (۲). Zan و همکاران (۲۰۱۰) جذب اسیدهیومیک را روی زئولیت اصلاح شده با ستیل پری دینیوم بروماید بررسی کردند

$k_1$  و  $90/3$  و  $k_2$  معادل  $21/49$  بود و ایزوترم جذب اسیدهیومیک به وسیله اکسیدگرافیت از مدل لانگمیر پیروی می‌کند (۱۹). مقایسه نتایج تعیین ضرایب و معادلات خطی مربوط به ایزوترم‌های جذب بیانگر آن است که ایزوترم لانگمیر برای هر سه غلظت جاذب دارای همبستگی مناسبی با داده‌ها است. بنابراین مدل لانگمیر به عنوان مدل هم دمای جذب برای هر سه غلظت جاذب انتخاب شد.

### نتیجه‌گیری

میزان pH و زمان تماس بهینه برای حذف اسیدهیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده با سیلیس به ترتیب معادل  $10/5$  و  $90 \text{ min}$  است. جذب اسیدهیومیک توسط نانوذرات اکسید آهن پوشش داده با سیلیس از مدل لانگمیر پیروی می‌کند و دمای بهینه این فرایند دمای محیط است.

- در این تحقیق از آهنربای دائم استفاده شد، با استفاده از آهنربای الکتریکی به جای آهنربای دائم می‌توان جهت اتوماسیون عمل تصفیه در تصفیه‌خانه‌ها از این فرایند استفاده کرد.

- با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان اظهار نمود که نانوذرات اکسید آهن پوشش داده شده با سیلیس هم به علت داشتن جایگاه‌های جذب فراوان و هم به علت خاصیت مغناطیسی نانوذرات و جداسازی آسان نانوذره به همراه آلاینده توسط یک آهنربا می‌تواند به عنوان یک روش عملی، قابل اعتماد، کارآمد و ارزان قیمت (از نظر تولید جاذب) برای حذف آلاینده‌ها از منابع آبی مدنظر قرار گیرد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل (بخشی از) پایان‌نامه با عنوان بررسی کارایی نانوذرات اکسید آهن سنتز شده و پوشش داده با سیلیس در حذف مواد آلی طبیعی از آب در مقطع کارشناسی ارشد، در سال ۱۳۹۱ است که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران اجرا شده است.



- and Engineering. 2013;11(1):14.
- 24- Faraji M, Yamini Y, Rezaee M. Magnetic nanoparticles: synthesis, stabilization, functionalization, characterization, and applications. Journal of Iranian Chemical Society. 2010;7(1):1-37.
- 25- Ambashta RD, Sillanpää M. Water purification using magnetic assistance: A review. Journal of Hazardous Materials. 2010;180(1):38-49.
- 26- Panneerselvam P, Morad N, Tan KA. Magnetic nanoparticle ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) impregnated onto tea waste for the removal of nickel(II) from aqueous solution. Journal of Hazardous Materials. 2011;186(1):160-68.
- 27- Peng Q, Liu Y, Zeng G, Xu W, Yang C, Zhang J. Biosorption of copper (II) by immobilizing *Saccharomyces cerevisiae* on the surface of chitosan-coated magnetic nanoparticles from aqueous solution. Journal of Hazardous Materials. 2010;177(1-3):676-82.
- 28- Rakhshae R, Panahandeh M. Stabilization of a magnetic nano-adsorbent by extracted pectin to remove methylene blue from aqueous solution: A comparative studying between two kinds of cross-liked pectin. Journal of Hazardous Materials. 2011;189(1-2):158-86.
- 29- Absal G, Asadi M, Kamran S, Sheikhan L, Goltz DM. Removal of reactive red-120 and 4-(2-pyridylazo) resorcinol from aqueous samples by  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic nanoparticles using ionic liquid as modifier. Journal of Hazardous Materials. 2011;192(2):476-84.
- 30- Shen Y, Tang J, Nie Z, Wang Y, Ren Y, Zuo L. Preparation and application of magnetic  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles for wastewater purification. Separation and Purification Technology. 2009;68(3):312-19.
- 31- Jang J, Lim H. Characterization and analytical application of surface modified magnetic nanoparticles. Microchemical Journal. 2010;94(2):148-58.
- 32- Zhao X, Shi Y, Wang T, Cai Y, Jiang G. Preparation of silica-magnetite nanoparticle mixed hemimicelle sorbents for extraction of several typical phenolic compounds from environmental water samples. Journal of Chromatography A. 2008;1188(2):140-47.
- 33- Girginova PI, Daniel-da-Silva AL, Lopes CB, Figueira P, Otero M, Amaral VS, et al. Silica coated magnetite particles for magnetic removal of  $\text{Hg}^{2+}$  from water. Journal of Colloid and Interface Science. 2010;345(2):234-40.
- 34- Li YS, Church JS, Woodhead AL, Moussa F. Preparation and characterization of silica coated iron oxide magnetic nano-particles. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2010;76(5):484-89.
- 35- Chen R, Zhi C, Huang Y, Bando Y, Zhang Z, Sugiura N, et al. Arsenic (V) adsorption on  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticle-coated boron nitride nanotubes. Journal of Colloid and Interface Science. 2011;359(1):261-68.
- 36- Zhan Y, Zhu Z, Lin J, Qiu Y, Zhao J. Removal of humic acid from aqueous solution by cetylpyridinium bromide modified zeolite. Journal of Environmental Sciences. 2010;22(9):1327-34.
- 37- Zhang X, Bai R. Mechanisms and kinetics of humic acid adsorption onto chitosan-coated granules. Journal of Colloid and Interface Science. 2003;264(1):30-38.
- 38- Avena MJ, Koopal LK. Kinetics of humic acid adsorption at solid-water interfaces. Environmental Science & Technology. 1999;33(16):2739-44.
- 39- Azizian S. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. Journal of Colloid and Interface Science. 2004;276(1):47-52.

## Investigation of synthesized silica coating $\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanoparticles efficiency in removal of NOM from water

E. Karimi pasandideh<sup>1</sup>, R. Rezaei kalantary<sup>2\*</sup>, S. Nasser<sup>3</sup>, A. H. Mahvi<sup>4</sup>, R. Nabizadeh<sup>5</sup>, A. Esrafil<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Department of Environmental Health Engineering, Iran university of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Iran university of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>3</sup> .Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran university of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran university of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>5</sup> Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran university of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>6</sup> Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Iran university of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received; 6 August 2013

Accepted; 3 November 2013

### Abstract

**Background and Objective:** The presence of natural organic materials (NOM) in water resources affects its quality (i.e. color, odor, and taste). In addition, it leads to the fouling of filters and membranes and reduces water treatment efficiency during flocculation/ coagulation. Moreover, NOM reacts with disinfectants and produces byproducts (DBPs), which are harmful to human health. Magnetic nanoparticles have been reported as effective adsorbents for the removal of pollutants from the aqueous media. In this study, we applied  $\text{SiO}_2$  coating on these nanoparticles in order to enhance their stability and dispersion in aqueous media and investigated their capability in NOM adsorption from water.

**Materials and Methods:** Iron oxide magnetic nanoparticles were prepared by co-precipitation. Then, we added Tetraethoxysilane (TEOS) to the solution in order to coat it with  $\text{SiO}_2$ . The adsorbent characteristics were determined by SEM and XRD. Then, we carried out the adsorption experiments under different pH(3-12) and contact time (5-240 min) performance conditions. The adsorption kinetic was determined with respect to different Humic acid adsorption times. Later, we determined the effect of different concentrations of adsorbent on different concentrations of Humic acid, and Langmuir and Freundlich coefficients based on the optimum conditions.

**Results:** The morphology investigation of adsorbent showed the average size of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  nanoparticles was 30-130 nm. The pH value of 10.5 and the contact time of 90 min at room temperature were determined as optimum conditions for removal of humic acid using  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  nanoparticles. The maximum adsorption capacity of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  was 192.30. The adsorption isotherm was fitted well by Langmuir model ( $R^2 > 0.90$ ) and the pseudo-second order model ( $R^2 > 0.98$ ) could better explain humic acid adsorption.

**Conclusion:** Having high number of active surface sites, magnetic properties, easily separation using magnetic field, and its cost-effectiveness, the  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  nanoparticles could be used as an efficient adsorbent in removal of humic acid from water.

**Key words:** Humic Acid, adsorption, magnetic nanoparticle, coating, NOM

---

\*Corresponding Author: rezaei@tums.ac.ir  
Tel: + 982188771118; Fax: + 982188779487