رفــع آلودگی از محیط زیســت با استفاده از نانوذرات آهن فلزی

محمدرضا کمالی (کارشناس ارشد ارزیابی محیطزیست – دانشگاه آزاد اسلامی– واحد علوم و تحقیقات تهران)
علی رضا کمالی (دکترای مواد – دانشگاه صنعتی مالک اشتر)
سید محمد مهاجرزاده (کارشناس ارشد مهندسی مکانیک – دانشگاه مادی مسکو)
جواد فهیم (کارشناس ارشد مهندسی مواد- دانشگاه آزاد اسلامی ـ واحد تهران جنوب)

چکیده

پودر فلزات نقشــی مهــم در آشکارســازی و رفع آلودگی مــواد آلاینده از محیط زیســت به خود اختصاص داده اســت. در این میان نانوذرات آهن به عنوان ماده ای جدید در رفع آلودگی از محیطزیســت بکار گرفته شــده اند. بدین ترتیب راه حلی به‌صرفه و اقتصادی برای حل بســیاری از چالش‌های محیط زیســتی در زمینه حذف آلودگی‌ها ابداع شده است. اکسیدهای فلزی نظیر در مقیاس نانومتری به عنوان موادی ارزان قیمت، قابلیت شــرکت در فرآیندهای فتوکاتالیســتی و رفع آلودگــی را دارند. در این مقاله ضمن مرور خواص نانوذرات فلزی و اکســیدی در فرآیند رفع آلودگی از محیط زیســت، فرآیند آلودگی زدایی توســط نانوذرات آهن فلزی مورد بررسی قرار گرفته و به عنوان نمونه فرآیند رفع آلودگی کروم ۶ ظرفیتی ($Cr(VI)$) توســط این نانوذرات شرح داده شده است.

کلمــات کلیدی: رفــع آلودگی، نانوذرات ،آهن، دی اکســید تیتانیوم، نانوفناوری.

جواد فهیم Tel: 021-22808723
محمد رضا کمالی 021-44632174

مقدمه

در هزاره جدید، بشر به طور جدی با چالش پاک سازی منابع طبیعی از جمله آب و هوا روبروست [۱]. در این راستا دانشمندان کوشیده‌اند ضمن بهره‌گیری از فن‌آوری‌های نو و بهینه، آثار سوء توسعه بر محیط زیست را کاهش داده و به حداقل برسانند. نانو فناوری از جمله مهمترین این فناوری ها است که کاربردهای آن در همه جا با هزینه کمتر، دوام و عمر بیش تر، مصرف انرژی پایین‌تر، هزینه نگهداری کمتر و خواص بهتر همراه است. از این رو به کارگیری این دانش در عرصه مهندسی محیط زیست نیز، به سان دیگر جنبه های دانش بشری، با شتاب رو به توسعه گذارده است [۲].

از جمله مهم‌ترین کاربردهای نانو فن‌آوری در محیط زیست می‌توان به استفاده از آن در کاهش انتشار آلاینده‌ها، رفع آلودگی و پایش محیط زیست، تولیدات سبز، تصفیه آب و غیره اشاره نمود [۳]. در فرآیند رفع آلودگی از محیط زیست، هم اکنون گزارش‌های بسیاری وجود دارند که از به‌کارگیری طیف وسیعی از نانو مواد در این زمینه حکایت دارند [۴و۵]. در این رابطه نانو فناوری خواهد توانست با بهره گیری از نانو ذرات نیمه هادی روش هایی جدید برای پاک سازی محیط زیست پیشنهاد نماید. در این قبیل فناوری ها، نانوذرات به عنوان کاتالیزور یا حس گر آلودگی مورد استفاده قرار می گیرند. به علاوه به کارگیری نور و امواج فراصوت، جهت فعال سازی این نانو ذرات، طراحی فناوری های اکسیداسیون سبز برای رفع آلودگی از محیط زیست را امکان پذیر نموده است. ویژگی های الکترونیکی و نوری وابسته به شکل و اندازه نانو ذرات، بابی جدید و مهیج از مطالعات را برای محققین محیط زیست در راه شناخت نقش آن ها در فرآیند رفع آلودگی محیط زیست گشوده است [۶]. تمرکز فعلی این مطالعات بر فرآیندهای پیشرفته اکسیداسیون می باشد [۷]. تجاری شدن محصولاتی از قبیل شیشه های خودپالا، کاشی های گندزدا و فیلترهای مانع آلودگی، اولین موفقیت های نانوسیستم ها در کاربردهای محیط زیستی هستند [۸].

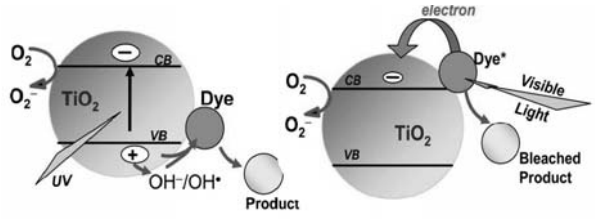
به حداکثر رساندن کارایی انتشار بارهای نورالقا در سیستم های نیمه هادی، هنوز هم به عنوان چالشی مهم در میان جوامع علمی مطرح می باشد. مطالعات پیشین عمدتاً بر روی قوانین و مکانیزم های واکنش های فوتوکاتا لیستی در فرآیندهای پیشرفته اکسیداسیون متمرکز بوده است [۱۱ـ۹].

در این مقاله، کاربرد نانو ذرات فلزی در فرآیندهای رفع آلودگی مورد بررسی و بحث قرار گرفته است.

کاربرد اکسیدهای فلزی نانومتری در رفع آلودگی محیط زیست

در حال حاضر نانوذراتی که به‌وسیله نور فعال می‌شوند به منظور استفاده در فرآیند رفع آلودگی های آلی از محیط های گوناگون مورد توجه هستند. از جمله این نانوذرات می‌توان به نیمه‌هادی‌هایی از قبیل دی‌اکسیدتیتانیوم (TiO_2) و اکسید روی (ZnO) اشاره نمود. مواد یاد شده در دسترس و ارزان‌قیمت بوده و سمیت چندانی ندارند [۱۲و۱۳].

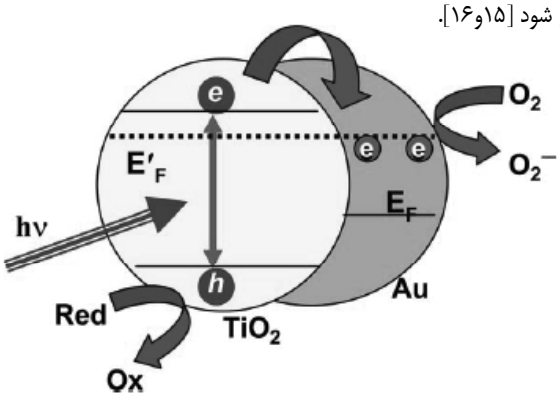
نانوذرات نیمه هادی به طور مستقیم و غیر مستقیم در فرآیندهای فوتوکاتالیستی شرکت می نمایند. این موضوع در شکل(۱)نشان داده شده است.



شکل۱ . انتقال بار نور القا در نانوخوشخه های نیمه هادی [۶]

توزیع بار مورد نیاز در ذرات نیمه هادی هنگامی اتفاق می افتد که الکترون های سست آن ها برانگیخته شوند. الکترون هایی که در اثر برانگیختگی توسط نور تولید شده اند، به همراه حفره های موجود در سطح نانو ذره، قادر به اکسیداسیون و احیای مواد جذب سطحی شده هستند. به همین ترتیب کلونی های نانوذرات نیز باعث گسترش واکنش فوتوکاتالیستی می شوند. در این کارکرد، نانومواد نیمه هادی به عنوان واسطه های انتقالی بار بین مولکول های جذب سطحی شده عمل می کنند.

با طراحی و تولید نانوکامپوزیت های متشکل از یک فلز و یک نیمه هادی نظیر Ag/TiO_2 ، امکان بهبود خواص کاتالیستی فتوکاتالیست ها امکان پذیر می گردد(شکل۲). برخورد با نیمه هادی به صورت غیر مستقیم باعث انتقال بار واسطه پر انرژی در مسیر دلخواه می شود. ترسیب یک فلز نجیب بر روی نانوذرات نیمه هادی عامل مهمی برای به حداکثر رساندن کارایی واکنش های فتوکاتالیستی به شمار می رود [۱۴]. عموماً چنین فرض می شود که فلزات نجیب (از قبیل پلاتین) به عنوان یک سینک برای بارهای تولید شده توسط نورعمل کرده و باعث انتقال بارها در فصل مشترک مولکول ها می شود [۱۵و۱۶].



شکل۲ـ انتقال الکترون و تعادل لایه فرمی در یک نانوکامپوزیت فلزی نیمه هادی [۶]

محققین بسیار علاقه مندند با دست‌کاری سطح نانو ذرات توسط رنگ‌های آلی یا غیرآلی، حساسیت آن‌ها را ازاشعه ماورای بنفش به سمت نور مریی افزایش دهند؛ چرا که تنها ۵ درصد طیف نور را امواج ماورای بنفش تشکیل می‌دهند [۲].

کاربرد نانوذرات آهن فلزی در رفع آلودگی

آهن فلزی (Fe^{0}) از احیاکننده‌های متوسط با قابلیت واکنش با اکسیژن محلول (DO) و گاهاً آب بر اساس معادلات زیر می‌باشد [۱].

$$2Fe^{O}_{(s)} + 4H^{+} + O_{2(aq)} \longrightarrow 2Fe^{2+}_{(aq)}.2H_2O$$

$$[Fe^{O}_{(s)} + 2H_2O_{(aq)} \longrightarrow 2Fe^{2+}_{(aq)} + H_{2(g)} + 2OH^{-}_{(aq)}]$$

معادلات بالا، واکنش‌های خوردگی الکتروشیمیایی کلاسیکی هستند که در آن ها آهن در نتیجه مواجهه با اکسیژن و آب اکسید می‌شود. واکنش‌های خوردگی را می‌توان از طریق دست‌کاری شیمی محلول و یا ترکیب فلز شدت بخشید و یا از انجام آن ممانعت به عمل آورد.

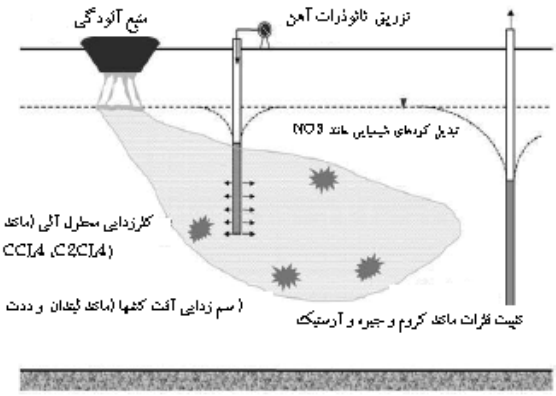
از آغاز دهه ۹۰ میلادی، شیمی خوردگی آهن در فرآیندهای تصفیه مواد شیمیایی خطرناک و سمی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷و۱۸]. در این خصوص محققین بسیاری موضوع را بررسی و به نتایج مشابهی دست یافته‌اند. در این قبیل واکنش ها، آلاینده ای مانند تتراکلرواتن (C_2Cl_4)، الکترون‌های حاصل از اکسیداسیون آهن را به سرعت جذب نموده و احیای ماده به اتن در واکنش زیر به وقوع می پیوندد [۱]:

$$C_2CL_4 + 4Fe^{O} + 4H^{+} \qquad C_2H_4 + 4Fe^{2+} + 4CL^{-}$$

کاربردهای محیط زیستی آهن فلزی توسط بسیاری از محققین مورد بررسی و تایید قرار گرفته است. از جمله مزایای این فرایندها، هزینه نسبتاً پایین و عدم تشکیل ترکیبات سمی است [۱۹]. همچنین از این فناوری ها می توان جهت رفع آلودگی در محل استفاده نمود (شکل۳) [۲].

عموماً نانوذرات را می‌توان با استفاده از هیدرید سدیم بور بعنوان یک احیاکننده‌ی کلیدی تهیه نمود. بعنوان مثال اگر $NaBH_4$ (۰/۲ مول) به محلول $FeCl_3$ و ۰/۶H_2O۰۵ مولار به نسبت حجمی ۱:۱ اضافه شود، نانوذرات آهن از طریق واکنش زیر تولید می شود [۲۰].

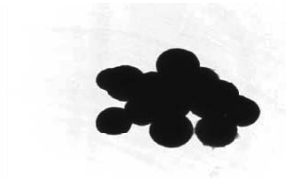
$$4Fe^{3+} + 3BH^{4-} + 9H_2O \longrightarrow 4Fe^{O} + 3H_2BO^{3-} + 12H^{+} + 6H2$$



شکل۳- ذرات آهن با مقیاس نانو برای رفع آلودگی در محل. اخیراً محققان این ذرات را به‌عنوان تکنیک اصلاحی پیشنهاد نموده‌اند. مزایای کاربرد نانوذرات آهن عبارتند از:
۱) اثر بر تبدیل مقادیر زیادی از آلاینده‌های محیط زیستی، ۲) ارزان‌قیمت بودن و۳) غیرسمی بودن[۲].

عموماً به منظور شدت بخشیدن به واکنش و اطمینان از رشد یکسان بلورهای آهن، به میزان بیش از حد هیدرید بور نیاز نمی‌باشد. ذرات آهن پالادیمی از طریق خیساندن ملایم نانوذرات آهن با محلول اتانول حاوی ۱٪ وزنی از استات پالادیم ($Pd(C_2H_3O_2)_2$) تهیه می‌شود. این فرآیند باعث احیا و ترسیب پالادیم بر روی سطح آهن می‌شود. در روش های مشابه به منظور تهیه ذرات کامپوزیتی از آهن و پالادیم، آهن و آرگون، آهن و نیکل، آهن و کبالت، آهن و مس استفاده شده است [۲۱]. در شکل (۴) یک تصویر فتومیکروگراف گرفته شده از نانوذرات آهن توسط نوعی میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM) ، نشان داده شده است.

اندازه‌گیری بیش از ۱۵۰ ذره محصول، نشان داد که قطر۸۰٪ آن‌ها کم تر از ۱۰۰ نانومتر و قطر ۳۰٪ آن‌ها از ۵۰ نانو متر کم تر است. نانوذرات فلزی آهن آلودگی زداهای قوی به حساب می‌آیند و دارای قابلیت آگلومره شدن با سطح خاک هستند. تحقیقات نشان داده‌اند که نانو ذرات کربنی به عنوان پشتیبانی برای آهن وکامپوزیت های دوفلزی (از قبیل آهن و نیکل) به‌شمار می‌روند [۲۲و۲۳].



شکل۴ـ فتومیکروگراف تهیه شده از یک دسته نانوذره آهن.طول میله میزان ۲۰۰ نانومتر است [۱].

تحقیقات اخیر آزمایشــگاهی به طور گســترده‌ای، نانوذرات آهن را به‌عنوان احیاکننده یا کاتالیزوری قوی برای از میان بردن محدوده وسیعی از آلاینده‌های محیط‌زیســتی شامل ترکیبات آلی کلرینه‌شــده و یون‌های فلزی مدنظر قرار داده اند [۲۴]. در جدول(۱) نمونه‌هایی در این خصوص آورده شده‌اســت [۱]. تقریبــاً تمامی هیدروکربن‌های هالوژنــه را می‌توان از طریق نانوذرات آهنی و به‌منظور تشــکیل هیدروکربن‌ها، احیا نمود. مدارک نمونه نشــان می‌دهند که مواد بر پایه آهن در جابه‌جایی بســیاری دیگر از آلاینده‌ها شــامل آنیون‌ها (از قبیل NO_3^-، $Cr_2O_7^{2-}$ و غیره) ، فلزات ســنگین از قبیل نیکل و جیوه و رادیونوکلئیدها (از قبیل UO_2^{2+}) دارای کاربردی موثر هستند.

جدول۱. آلاینده های معمول محیط زیست که توسط نانوذرات آهن امکان حذف آن ها از محیط وجود دارد

تری هالومتان ها	متان های کلرینه
$(CHBr_3)$	(CCl_4)
$(CHBr_2Cl)$	$(CHCl_3)$
$(CHBrCl_2)$	(CH_2Cl_2)
اتن های کلرینه	(CH_3Cl)
(C_2Cl_4)	بنزن های کلرینه
(C_2HCl_3)	(C_6Cl_6)
$(C_2H_2Cl_2)$	(C_6HCl_5)
$(C_2H_2Cl_2)$	$(C_6H_2Cl_4)$
$(C_2H_2Cl_2)$	$(C_6H_3Cl_3)$
(C_2H_3Cl)	$(C_6H_4Cl_2)$
سایر هیدرو کربن های پلی کلرینه	(C_6H_5Cl)
PCBs	آفت کش ها
Dioxins	$DDT(C_{14}H_9Cl_5)$
(C_6HCL_5O)	$(C_6H_6Cl_6)$
سایر آلاینده های آلی	رنگ های آلی
$(NDMA)\ (C_2H_6N_2O)$	$(C_{16}H_{11}N_2NaO_4S)$
$TNT(C_7H_5N_3O_6)$	$(C_{12}H_{13}ClN_4)$
آنیون های غیر آلی	$(C_{12}H_9N_2NaO_5S)$
(Cr_2O_{7-2})	Acid Red Arsenic
(AsO_{4-3})	فلزات سنگین
(ClO_{4-})	(Hg_{2+})
(NO_{3-})	(Ni_{2+})
	(Ag_{+})
	(Cd_{2+})

حذف کروم؛ رویکردی از کاربردهای نانوذرات آهن فلزی

رفع آلودگی از آب های زیرزمینی توســط نانو ذرات در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اســت. کروم (Cr) آلاینده اصلی آب های زیرزمینی به شــمار می رود. این ماده به طور گســترده در فرآیندهای صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد. کروم شــش ظرفیتی Cr(VI) ماده ای سمی و سرطانزا برای انســان و حیوانات به شمار می رود. در این میان کروم سه ظرفیتی Cr(III) دارای ســمیت کــم تر و نیز قابلیت تحرک کم تری نســبت به کروم شــش ظرفیتی و قاعدتاً دارای خطر کم تری می باشد. بنابراین فرآیند کاهش کروم شش ظرفیتی به کروم سه ظرفیتی دارای مزایای فراوانی برای محیط زیست و روشــی مناسب برای از میان بردن آلودگی از مناطق آلوده به شمار می رود [۲۵].

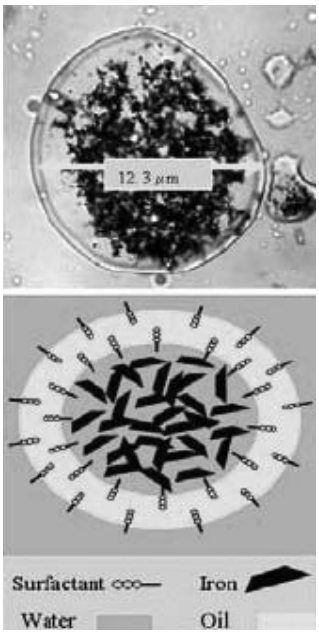
محققین بسیاری بر رفع آلودگی کروم شش ظرفیتی تمرکز نموده و روش های تصفیه فراوانی در این خصوص توسعه یافته است. در این زمینه جذب سطحی فیزیکی شیمیایی مورد مطالعه و بررسی گسترده قرار گرفته است. با این وجود این فرآیندها پرهزینه بوده و تنها موجب انتقال کروم ســمی می شــود اما در حذف آن توفیقی ندارد. از ســوی دیگر حــذف آلودگی به روش بیولوژیکی به وســیله باکتری ها یا ســایر عوامل زیســتی به طور قابل ملاحظه ای قادر به کاهش آلودگی ناشــی ازکروم شــش ظرفیتی بوده و از نظــر اقتصادی نیز به صرفه است [۲۶]؛ اما رشد باکتری ها خود عاملی محدود کننده می باشد.

احیا کننده های شیمیایی مختلفی با کارایی و سرعت بالا جهت حذف کروم شــناخته شده اند. بسیاری از این احیا کننده ها از قبیل، آهن فلزی و غیره در گذشته نیز استفاده شده اند [۲۷و۲۸]. در این میان به نظر می رسد آهن فلزی از بهترین و کارآمد ترین این مواد باشد [۲۹].

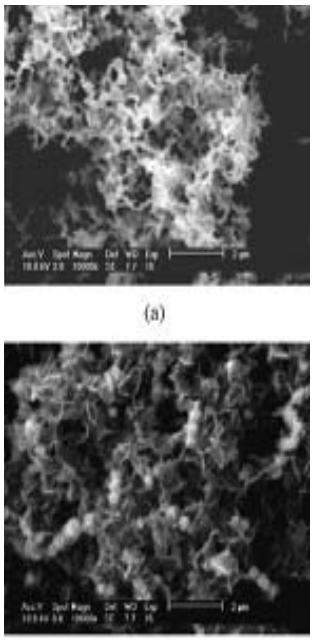
آهــن فلزی، احیا کننده مهمی برای کروم ۶ ظرفیتی به شــمار می رود. این ماده به منظور حذف آلودگی از قســمت های آلوده و تبدیل کروم ۶ ظرفیتی به کروم ۳ ظرفیتی غیر ســمی به کار می رود. مطالعات نشان داده اند در دوز ۰/۴ گرم بر لیتــر، ۱۰۰درصد کروم ۶ ظرفیتی(۲۰میلیگرم بر لیتر) به کروم ۳ ظرفیتی تبدیل شده است.

در سال ۱۹۹۵ پاول و همکارانش دریافتند که ساز و کار کاهش ظرفیت کروم شــش ظرفیتی به وســیله آهن فلــزی، فرآیندی چرخه ای و شــامل چندین واکنش خردگی الکترو شــیمیایی است. آلوتیز و شــر نیز در سال ۲۰۰۲ تاثیر میزان غلظت آهن فلزی و اســیدیته را بر روی ســرعت احیا کروم ۶ظرفیتی توسط آهن فلزی بررسی نمودند [۲۵].

اخیراً ثابت شده است نانو ذرات آهن فلزی، به دلیل فعالیت سطحی بسیار زیاد خود، به شدت نرخ احیای آلاینده را افزایش می دهند. نانو ذرات تازه تشکیل، به دلیل تمایل به واکنش سریع با محیط اطراف از قدرت احیا کنندگی بالایی برخوردار هستند [۳۰].



شکل۵ . نانو ذرات آهن فلزی آگلومره {۳۱}.



شکل۶ . تصویر گرفته شده توسط ESEM از نانوذرات آهن قبل از واکنش(a) و پس از واکنش(b)

از سوی دیگرآگلومره شدن سریع نانو ذرات آهن، به نوبه خود، باعث تولید ذرات درشت و کاهش سریع فعالیت نانو ذرات می شود. از این رو طراحی فرآیندی جدید برای افزایش پایداری نانو ذرات آهن فلزی ضروری می باشد. در این خصوص راونیدران و همکارانش در سال ۲۰۰۳ نشان دادند که می توان از آهار به عنوان ماده ای مناسب جهت اصلاح این نقیصه در نانوذرات آهن در محیط های آبی استفاده نمود (شکل۶).

هی و ژائو در سال ۲۰۰۵ گروهی جدید از نانوذرات کامپوزیتی دوفلزی پایدار شده توسط آهار را معرفی نمودند. در این مواد آهار از آگلومره شدن نانوذرات جلوگیری می کند.

واکنش احیای کرم شش ظرفیتی و ترسیب توامان کرم(III) و آهن(III) به ترتیب زیر است[۳۰]:

گام اول در انجام این واکنش ها، آماده سازی آهن فلزی یا پایدارکردن نانوذرات آهن فلزی بوسیله آهار می باشد. تحقیقات هم اکنون در موارد زیر در جریان است:

۱ـ تعیین مشخصات آهن فلزی توسط میکروسکوپ الکترونی مجهز به اسکن محیطی(ESEM)

۲ـ کمی کردن اثر دوز نانوذرات آهن فلزی

۳ـ مقایسه کارایی احیای کرم ۶ظرفیتی توسط انواع مختلف ذرات آهن فلزی

۴ـ آنالیز فرآیند واکنش از لحاظ الکتروشیمیایی

نتیجه گیری

واکنش های مبتنی بر فرآیند خوردگی از گذشته جهت رفع آلودگی و حفظ محیط زیست مورد استفاده بوده است. ظهور نانو فناوری و امکان تولید نانو ذرات فلزی نظیر نانو ذرات آهن فلزی موجب انقلابی در رفع آلودگی ها شده است. احیای کروم ۶ ظرفیتی به کروم ۳ ظرفیتی از کاربردهای مهم ذرات نانومتری آهن است. نانو ذرات اکسیدهای فلزی نیمه هادی نظیر دی اکسید تیتانیم دارای قابلیتی منحصر به فردی در ظهورخاصیت فتوکاتالیزوری بوده و از اقبال فزاینده ای جهت احیای آلودگی های در تماس به سطح این مواد برخوردارند.

فهرست منابع

1. Wei-xian Zhang;2003; Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview; Journal of Nanoparticle Research. 2003 ,332–323 :5.

۲ . آزاده اخوان بلورچیان، محمدرضا کمالی ومحمدحسین گلشنی، نانو فناوری و کاربرد آن در مهندسی محیط زیست، فصل‌نامه دنیای نانو، شماره‌ی دهم، سال چهارم، بهار۱۳۸۷.

3 . Kong; J.; et al. Science 17 .625–622 ;287 ;2000. Cui; Y.; Wei; Q.; Park; H.; Lieber; C. M. Science ;2001 1292–1289;293.

4 . Kamat; P. V.; Huehn; R.; Nicolaescu; R. J. Phys. Chem. B. 794–788 ;106 ;2002.

5 . Subramanian; V.; Wolf; E.; Kamat; P. V. J. Phys. Chem. B 446;11–439;11 ;105 ;2001.

6 . PrashantV. Kamat, Dan Meisel;2003; Nanoscience opportunities in environmental remediation; C. R. Chimie 1007–999 6.

7 . P.V. Kamat, D. Meisel, Nanoparticles in Advanced Oxidation Processes, Curr. Opin. Colloid Interface Sci. 282 (2002) 7.

8 . A. Fujishima, K. Hashimoto, T.Watanabe, TiO2 photocatalysis. Fundamentals and Applications, Bkc, Inc. Tokyo, Japan, 1999.

9 . P.V. Kamat, Photochemistry on nonreactive and reactive (semiconductor) surfaces, Chem. Rev. 93 267 (1993).

10 . M.R. Hoffmann, S.T. Martin, W. Choi, D.W. Bahnemann, Environmental applications of semiconductor photocatalysis, Chem. Rev. (1995) 95 69.

11 . N. Serpone, Relative phtotonic efficiencies and quantum yields in heterogeneous photocatalysis, J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 1 (1997) 104.
12 . Zhang; W.-X.; Wang; C.-B.; Lien; H.-L. Catal. Today 395–387 ;40 ;1998.
13 . Elliott; D. W.; Zhang; W.-X. Environ. Sci. Technol. 4926–4922 ;35 ;2001
4 . 1A.J. Bard, Design of semiconductor photoelectrochemical systems for solar energy conversion, J. Phys. Chem. 172(1982) 86.
-15 N. Chandrasekharan, P.V. Kamat, Improving the photoelectrochemical performance of nanostructured TiO2 films by adsorption of gold nanoparticles, J. Phys. Chem. B 10851 (2000) 104.
16 . V. Subramanian, E.E. Wolf, P.V. Kamat, Green emission to probe photoinduced charging events in ZnO–Au nanoparticles. Charge distribution and Fermi-level equilibration, J. Phys. Chem. B (2003) 107 7485–7479.
17 . Gillham R.W. & S.F. O'Hannesin, 1994. Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron. Ground Water 967–958 ,32
18 . O'Hannesin S.F. & R.W. Gillham, 1998. Long-term performance of an in situ 'ironwall' for remediation ofVOCs. GroundWater 170–164 ,36.
19 . EPA (US Environmental Protection Agency), 2003c. Databases of innovative technologies. http:// www.epa.gov/tio/databases
20 . Wang C. & W. Zhang, 1997. Nanoscale metal particles for dechlorination of PCE and PCBs. Environ. Sci. Technol. 2156–2154 ,(7)31.
21 . Xu Y. & W. Zhang, 2000. Subcolloidal Fe/Ag particles for reductive dehalogenation of chlorinated benzenes. Indus. Eng. Chem. Res. 2244–2238 ,(7)39.
22 . Ponder S.M., J.G. Darab & T.E. Mallouk, 2000. Remediation of Cr(VI) and Pb(II) aqueous solutions using supported, nanoscale zero-valent iron. Environ. Sci. Technol. 2569–2564 ,34.
23 . Ponder S., J.G. Darab, J. Bucher, D. Caulder, I. Craig, L. Davis, N. Edelstein, W. Lukens, H. Nitsche, L. Rao, D.K. Shuh & T.E. Mallouk. 2001. Surface chemistry and electrochemistry of supported zerovalent iron nanoparticles in the remediation of aqueous metal contaminants. Chem. Mater. ,(2)13 486–479.
24 . Lien H., 2000. Nanoscale bimetallic particles for dehalogenation of halogenated aliphatic compounds. Unpublished
Dissertation, Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania.
25 . Bowman, R.S., 2003. Applications of urfactant-modified zeolites to environmental remediation. Microporous and Buerge, I.J., Hug, S.J., 1999. Influence of mineral surfaces on chromium(VI) reduction by iron(II). Environ. Sci. Technol., -33:4285 4291.
26 . Chen, J.M., Hao, O.J., 1998. Microbial chromium(VI) reduction. Critical Rev. Environ. Sci. Technol., 251-28:219.
27 . Hua, B., Deng, B., 2003. Influences of water vapor on Cr(VI)
reduction by gaseous hydrogen sulfide. Environ. Sci. Technol., 4777-37:4771.
28 . Buerge, I.J., Hug, S.J., 1999. Influence of mineral surfaces on chromium(VI) reduction by iron(II). Environ. Sci. Technol., 4291-33:4285.
29 . Alowitz, M.J., Scherer, M.M., 2002. Kinetics of nitrate, nitrite, and Cr(VI) reduction by iron metal. Environ. Sci. Technol., 306-36:299.
30 . NIU Shao-feng, LIU Yong, XU Xin-hua, LOU Zhang-hua, 2005 , Removal of hexavalent chromium from aqueous solution by iron nanoparticles,Journal of Zhejiang University SCIENCE
31 . Beshoy Latif, August 2006, Nanotechnology for Site Remediation: Fate and Transport of Nanoparticles in Soil and Water Systems, University of Arizona, U.S. Environmental Protection Agency.