مجله دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی
زمستان ۱۳۹۰
دوره سوم، شماره ۴، صفحات ۱۳-۷

Journal of North Khorasan University of Medical Scienc
Winter 2011
Vol 3, Issue 4, Page 7-13

حذف کروم (VI) از محلول های آبی با استفاده از فرایند های UV/ZnO، UV/TiO_2 و UV/H_2O_2

انور اسدی[۱]، محمد هادی دهقانی[۲*]، محمد رضا زارع[۳]، آیت رحمانی[۴]، حافظ گلستانی فر[۱]

چکیده

زمینه و هدف: مطالعه حاضر با توجه به مخاطرات فراوان فلز سنگین کروم در محیط زیست از جمله سرطان پوست و ریه و آسیبهای کلیوی و کبدی با هدف بررسی حذف Cr(VI) با استفاده از فرایند های نانو فتوکاتالیستی و فتو شیمیایی UV/ZnO، UV/TiO_2 و UV/H_2O_2 از محلول های آبی انجام پذیرفت.

مواد و روش کار: در این مطالعه فاکتور های موثر بر فرایند احیاء مثل غلظت کاتالیست (g/L ۰/۱۵-۰/۰۵)، غلظت H_2O_2 (mol/L ۱/۵-۰/۵) و pH مورد بررسی قرار گرفتند. غلظت اولیه سوبسترا بین mg/L ۱۵-۰/۱ متغیر بود. محلول استوک کروم (VI) با استفاده از انحلال دی کرومات پتاسیم ($K_2Cr_2O_7$) در آب مقطر یک بار تقطیر تهیه گردید. غلظت باقیمانده کروم بوسیله دستگاه اسپکتروفتومتری در طول موج ۵۴۰ نانومتراندازه گیری شد.

یافته ها: نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذرات TiO_2 و ZnO و H_2O_2 و همچنین کاهش pH راندمان احیای کروم افزایش پیدا می‌کند. همچنین راندمان حذف با افزایش غلظت اولیه سوبسترا کاهش پیدا کرد. بیشترین احیای کروم با ZnO در pH بین ۸-۴ حاصل شد. همچنین با افزایش pH راندمان حذف توسط TiO_2 و H_2O_2 کاهش یافت. از طرفی نتایج مطالعه حاضر نشان داد که فرایند احیاء از سنتیک درجه اول لانگمویر- هنشلود پیروی می‌کند.

نتیجه گیری: بطور کلی نتایج حاصله بیانگر آن است که می‌توان از فرایند پاک و بدون باقیمانده UV/ZnO، UV/H_2O_2 و UV/TiO_2 به صورت موثر برای حذف کروم ۶ ظرفیتی از محیط های آبی استفاده نمود.

واژه های کلیدی: H_2O_2، TiO_2/ZnO، کروم (VI) ، احیای فتوکاتالیستی، محلول آبی

۱- دانشجوی دوره کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
۲- دانشیار بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و انستیتو تحقیقات بهداشتی و مرکز تحقیقات محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
۳- دانشجوی دوره دکتری، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
۴- کارشناس ارشد بهداشت محیط، عضو هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، بجنورد، ایران
***نویسنده مسئول:** تهران دانشگاه علوم پزشکی تهران، دانشکده بهداشت و انستیتو تحقیقات بهداشتی، گروه مهندسی بهداشت محیط
تلفن: ۸۸۹۵۴۹۱۴-۰۲۱ پست الکترونیک:dehghanihadi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۹/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۱/۶

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

مقدمه

کروم معمولاً در پساب صنایع آبکاری، دباغی پوست، ذوب کرومیت، الکترونیک، پیگمانت و سایر صنایع شیمیایی وجود دارد[۳-۱]. استفاده بی‌رویه و تخلیه پساب این صنایع به محیط زیست مخاطرات فراوانی را برای انسان و اکوسیستم در پی خواهد داشت [۴]. کروم در دو حالت معمول اکسیداسیون، Cr(IV) و Cr (III) در طبیعت وجود دارد.کروم (VI) برای بیشتر میکروارگانیسم ها سمی (در غلظت‌های بالاتر از mg/L ۰/۰۵) است. از طرفی می‌تواند خاصیت سرطانزائی برای موجودات زنده را داشته باشد. این ترکیب باعث تحریک و خوردگی پوست در انسان نیز می‌گردد. کروم (VI) در آب خیلی محلول بوده و می‌تواند درpH مختلف آنیون‌های دو ظرفیتی مثل کرومات (CrO_4^{2-})، دی کرومات($Cr_2O_7^{2-}$) و هیدروژن کرومات ($HCrO_4^-$) را تشکیل بدهد[۱،۲].

روش‌های مختلف حذف کروم شامل تصفیه شیمیایی، استخراج با حلال، تبادل یون، جذب، فیلتراسیون غشایی، تکنولوژیهای تصفیه الکترو شیمیایی، فرایند های بیولوژیکی و اخیرا روش‌های فتوکاتالیستی می‌باشند [۷-۵]. تعدادی از روش‌های بالا معایبی مثل غیر اقتصادی بودن، عدم حذف کامل کروم، افزایش نیاز به ترکیبات شیمیایی و تولید لجن یا مواد زائد که نیازمند تصفیه بعدی می‌باشند را دارا هستند. در سال‌های اخیر روش‌های شیمیایی مثل احیا با سدیم متابی سولفیت یا SO2 و ترسیب با آهک به صورت گسترده برای حذف کروم ۶ ظرفیتی استفاده گردیده است اما این روش علاوه بر نیاز به مواد شیمیایی اضافی برای احیای کامل Cr (VI) باعث تشکیل لجن در حجم بالا و آزاد شدن دی اکسید سولفور می‌گردد که از مشکلات مرتبط با این روش می‌باشد [۶، ۸]. نگرانی های عمومی در مورد ورود فلزات سنگین به محیط زیست باعث تقویت تحقیق های جدید در زمینه حذف فلزات سنگین و توسعه روش‌های جدید گردیده است. از طرف دیگر روش های فتوکاتالیستی به منظور احیای کرومات از روش‌های جدید، دوستدار محیط زیست و کاملاً جذاب در محیط های آبی می‌باشند. این روش ها نیازمند شرایط بهره برداری متوسط بوده که بر اساس تحت تابش قرار گرفتن نیمه هادی‌ها (SC) و در نتیجه تولید جفت الکترون- حفره می‌باشند[۹]. تعدادی از کاتالیست‌های نیمه هادی مثل ZnO، ZnS، TiO_2، WO_3و CdS به‌صورت گسترده برای احیای فتوکاتالیستی Cr (VI) به Cr (III) مورد استفاده قرار گرفته اند. در میان این کاتالیست ها WO_3 کمتر در دسترس می‌باشد و CdS خود تولید فلز سمی کادمیوم می‌کند. اما ZnO می‌تواند در درجه حرارت اتاق تحت انرژی کم برانگیخته گردد و از مهمترین ویژگی‌های آن غیر سمی بودن آن است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است[۶ ، ۱۰]. احیای نوری Cr (VI) به Cr (III) می‌تواند از طریق فرایند های فتو کاتالیستی که در واکنش های ساده شده زیر خلاصه گردیده است انجام بگیرد:

$TiO_2 + h\nu \rightarrow ZnO\ (h^+ + e^-)$

$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- \rightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O$

$2H_2O + 4h^+ \rightarrow O_2 + 4H^+$

$H_2O + h^+ \rightarrow {}^{\bullet}OH + H^+$

$Cr(VI) + H_2O_2 + H^+ \rightarrow Cr(III) + H_2O + O_2$

این فرایندها شامل ۴ مرحله می‌باشد : ۱- تولید جفت الکترون- حفره در اثر برخورد UV به سطح فتو کاتالیست ۲- احیای Cr (VI) به Cr (III) در اثر الکترون تولید شده ۳- تولید اکسیژن در اثر حفره تولید شده در صورتی که ماده آلی در محلول وجود نداشته باشد. H_2O_2 مسئول تولید الکترون در فرایند احیای کروم ۶ ظرفیتی می‌باشد [۶، ۱۰]. در این مطالعه از روش نانو فتوکاتالیستی (UV/ZnO/H2O2) برای احیای Cr(VI) به Cr(III) در محیط های آبی استفاده گردیده است. اثر پارامترهای مختلف مثل pH و غلظت احیاء کننده بر روی فرایند بررسی گردیده و کارایی آنها بر روی نمونه‌های واقعی سنجش شده است.

روش کار

این مطالعه یک مطالعه بنیادی- کاربردی می باشد که در سیستم ناپیوسته و در آزمایشگاه شیمی آب و فاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران انجام گردید. دستگاه اسپکتروفتو متری (Perkin-Elmer Lambda 25 UV/VIS Spectrometer (Perkin-Elmer, Norwalk, CT) با سل ۱-cm برای سنجش غلظت کروم استفاده گردید. غلظت پتاسم دی کرومات در محلول طبق روش ۳۵۰۰ استاندارد متد با روش فتو متر ۱/۵ دی فنیل کاربازید در λ_{max}= ۵۴۰ nm تعیین گردید [۱۱]. برای تنظیم pH نمونه ها از pH متر (Metrohom 827) استفاده شد. پتایسم دی کرومات و H_2O_2 (خلوص آزمایشگاهی) از شرکت آنا طب- تهران خریداری گردید.

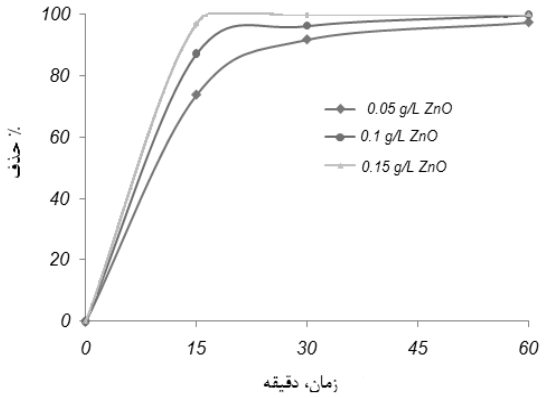
[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

اکسید روی (GR) از شرکت نانو اسپادنا اصفهان و دی اکسید تیتانیوم از شرکت دگوسا تهیه شد. خلوص نانو ذره دی اکسید تیتانیوم مورد استفاده ۹۹/۵٪ بود. محلول H_2O_2 ۲٪ در این مطالعه استفاده شد که از طریق رقیق کردن استوکس ۳۰٪ در آب مقطر تهیه گردید. چون H_2O_2 ناپایدار است محلول ۲٪ به صورت روزانه قبل از مصرف تهیه گردید. محلول استوک کروم (VI) با استفاده از حل کردن دی کرومات پتاسیم ($K_2Cr_2O_7$) در آب مقطر یک بار تقطیر تهیه گردید. جهت تنظیم pH از اسید کلریدریک و سود یک نرمال استفاده گردید.

آزمایشات احیای نوری در یک راکتور سیلندر شیشه ای با قطر ۰/۰۱۲ m و ارتفاع ۰/۰۳ m که در یک حمام خنک کننده قرار گرفته بود انجام گردید. لامپ ۱۲۵Wفشار متوسط بخار Hg که در داخل یک لوله کوارتز قرار گرفته بود به عنوان منبع تابش استفاده گردید. درجه حرارت راکتور C^o ۱±۲۰ و حجم راکتور lit ۱ بود. قبل از تابش محلول به مدت ۲۰ دقیقه در تاریکی توسط شیکر تکان داده شد تا اینکه هر گونه جذب و واجذب به تعادل برسد. نمونه‌ها در زمان‌های مختلف تابش گرفته شد و با سانتریفویژ دور ۵۰۰۰rpm به مدت ۳۰ دقیقه سانتریفویژ گردید و برای پیشرفت واکنش مورد آنالیز قرار گرفت. درصد حذف Cr (VI) از طریق اختلاف بین غلظت اولیه (C_0) و نهایی (C_{final}) محاسبه گردید.

یافته ها

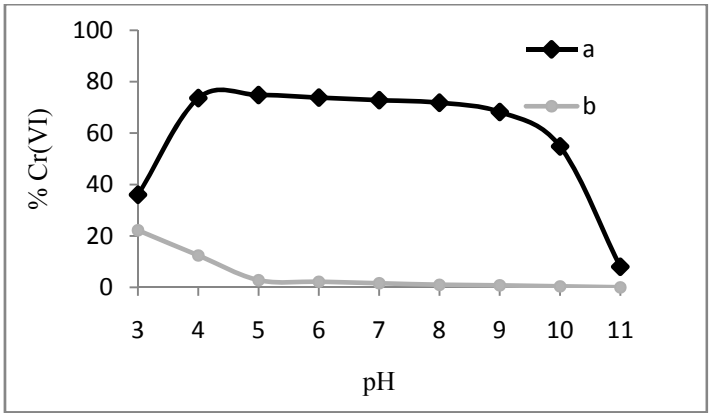
تأثیر زمان تابش پرتو بر روی میزان حذف کروم (VI) در شکل ۱ نشان داده شده است. محدوده زمان تابش بین ۶۰- ۰ دقیقه بوده و همانطوری که ملاحظه می‌گردد با افزایش زمان تابش راندمان حذف افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱: تأثیر زمان تابش بر روی میزان حذف کروم (VI) (Cr (VI)=۰/۰۵ mg/L ،pH=۷)

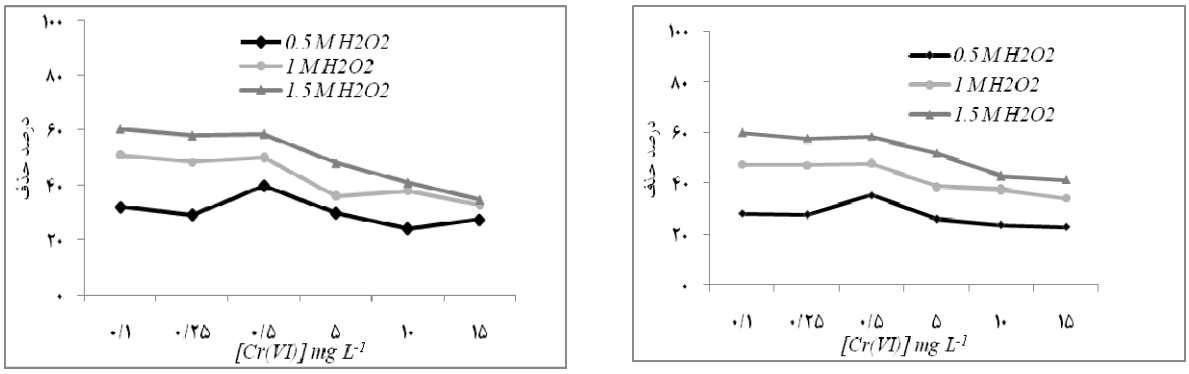
همانطوری که در نمودار ۲ مشاهده می‌گردد مقدار کرومات جذب شده بر روی ذرات ZnO ناچیز بوده و در pH های نزدیک به ۸ و بالاتر به صفر می‌رسد. همانطور که مشاهده می‌گردد برای pH های بالاتر از ۸ در صد Cr(VI) احیاء شده با افزایش pH شدیداً کاهش می‌یابد و حداکثر احیاء در محدوده pH بین ۵-۴ (حدود ۷۰٪) صورت گرفته است. محدوده مناسب pH برای احیای فتوکاتالیتیکی Cr (VI) توسط ZnO بین ۸-۴ می‌باشد و همانطور که در بالا ذکر گردید این pH به طور کلی در محدوده pH آب‌های سطحی و زیر زمینی می‌باشد. این مطالعه نشان داد که با افزایش غلظت ZnO از ۰/۰۵ به ۰/۱۵ g/L درصد احیای فتوکاتالیتیکی Cr(VI) از ۷۸/۳ به ۹۷ درصد افزایش پیدا می‌کند.

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]



شکل ۲: درصد Cr (VI) جذب شده (منحنی a) و احیای فتوکاتالیکی (منحنی b) بر حسب pH.

تأثیر فرایند اکسیداسیون پیشرفتهUV/H_2O_2 بر روی میزان حذف کروم در pH های ۵ تا ۹ و زمان تابش ۱۵ تا ۶۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. میزان H_2O_2 بین ۱/۵-۵/. mol/L و غلظت اولیه کروم بین ۱۵ mg/L-۱/. بود. تأثیر فرایند در شکل ۳ نشان داده شده است.



الف ب

شکل ۳: تأثیر فرایند UV/H_2O_2 بر میزان حذف کروم در غلظت های مختلف
(الف) زمان تابش ۱۵ دقیقه، pH =۵ ب) زمان تابش ۳۰ دقیقه، pH =۷)

تحقیقات مختلفی که بر روی احیای فتوکاتالیتیکی Cr(VI) انجام گرفته است نشان داده که ثابت سرعت واکنش احیا از سنتیک لانگمویر- هنشلود پیروی می‌کند. در این مطالعه نیز مشخص گردید که فرایند از سنتیک درجه اول پیروی می‌کند.

$$Ln[C_0/C]=k_{red}t$$

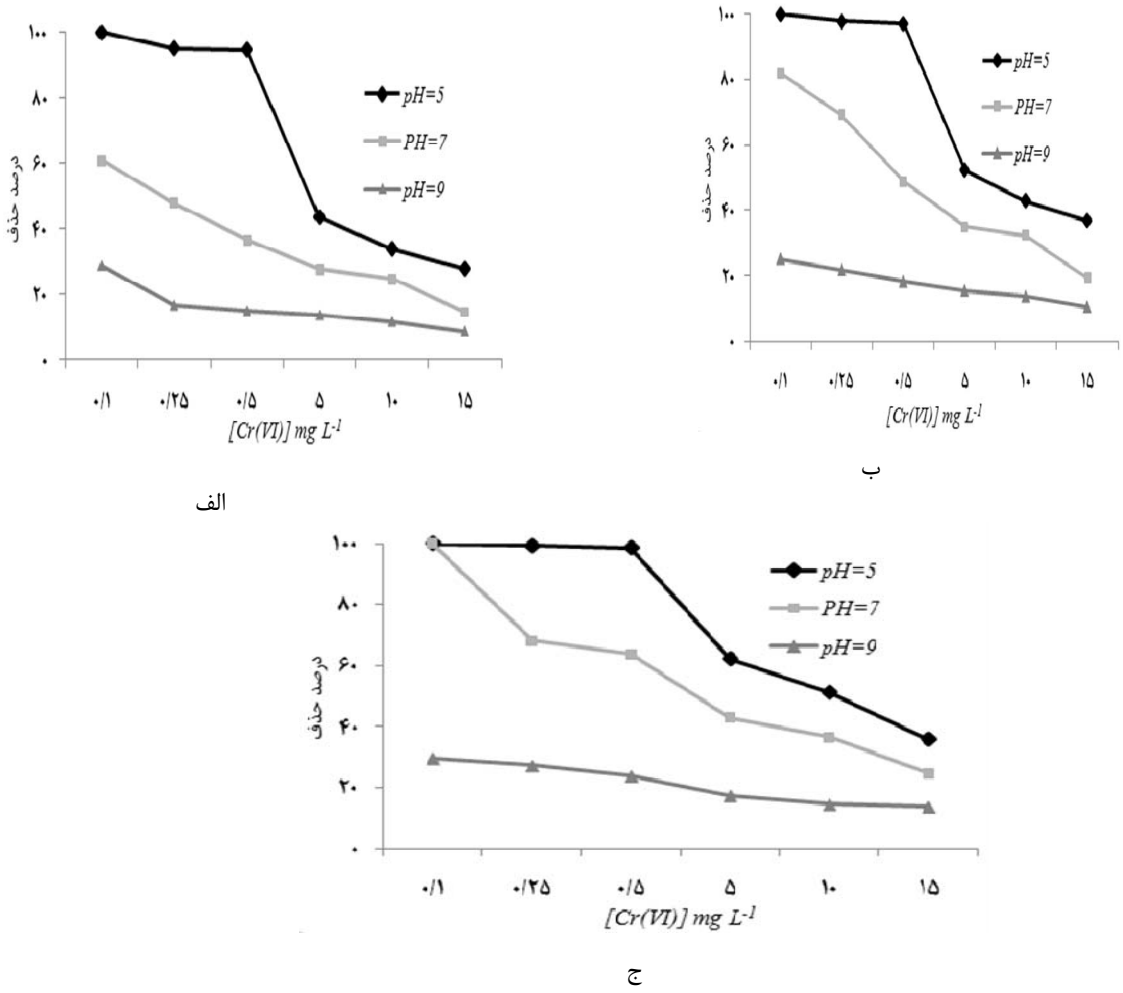
در این رابطه k_{red} ثابت سرعت احیای فتوکاتالیتیکی، C_0 غلظت اولیه، C غلظت کروم بعد از زمان تابش t و t زمان تابش می‌باشد. k_{red} احیای توسط فرایند UV/ZnO در محلول‌های آبی برای pHهای مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است که با افزایش pH میزان k_{red} کاهش پیدا می‌کند.

جدول۱: ثابت سرعت احیای درجه اول کروم ۶ ظرفیتی توسط فرایند UV/ZnO در pH های مختلف (C_0[Cr(5 mg/L)])

pH	k_{red} (min^{-1})	r^2
۵	۰/۰۲۴۷۵	۰/۹۹۵۵
۷	۰/۰۲۲۴۴	۰/۹۹۳
۹	۰/۰۱۹۵۴	۰/۹۱۱۷

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

تأثیر پارامتر های pH، غلظت اولیه Cr(VI) در زمان های مختلف تابش در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: نمودار غلظت- درصد حذف کروم در pH های مختلف (TiO_2 = ۱۵۰ mg/L، زمان تابش : الف) ۱۵ دقیقه ب) ۳۰ دقیقه ج) ۶۰ دقیقه)

بحث

احیای کروم توسط فرایند نانوفتوکاتالیستی (UV/ZnO)

تأثیر زمان تابش بر روی کارایی حذف در سیستم مورد مطالعه : برخورد پرتو UV با سطح ZnO موجب آزاد شدن جفت الکترون- حفره خواهد شد. بنابراین هر چه زمان تابش افزایش یابد میزان الکترون های بیشتر تولید شده و در نتیجه میزان حذف Cr(VI) افزایش پیدا خواهد کرد.

اثر pH بر روی کارایی حذف در سیستم مورد مطالعه : درصد Cr (VI) جذب شده با افزایش pH کاهش می‌یابد زیرا ZnO در pH پایین حاوی بارهای مثبت بیشتری بوده و گونه های Cr (VI) که شامل $HCrO_4^-$، CrO_4^{2-} و $Cr_2O_7^{2-}$ می‌باشد را بیشتر جذب می‌کند. این نتایج با یافته های مطالعات Domenech and Munoz 1987 و Ku and Jung 2001 همخوانی دارد[۱۳-۱۲]. pH محلول‌های حاوی Cr(VI) اثر مهمی بر روی فرایندهای فتوکاتالیتیکی دارد. احیای Cr(VI) در pH های اسیدی و بازی به ترتیب بر اساس واکنش‌های زیر انجام می‌گیرد [۱۴] :

$$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- \rightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O$$

$$Cr_2O_7^{2-} + 14H_2O + 3e^- \Leftrightarrow Cr(OH)_3 + 5OH$$

به هر حال احیای فتوکاتالیتیکی Cr (VI) به Cr (III) مصرف کننده پروتون در شرایط اسیدی و تولید کننده هیدروکسیل در شرایط قلیایی می‌باشد. بنابراین درصد

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

احیای Cr (VI) با افزایش pH کاهش می‌یابد. نتایج آزمایشاتی که در این زمینه صورت گرفته در شکل ۲ منحنی b نشان داده شده است. pH های اسیدی و بازی برای کاتالیست مضر بوده و ZnO در pH های خیلی بالا و پایین حل خواهد شد. این نتایج توسط محققین دیگر هم اثبات گردیده است[۲، ۱۰، ۱۵].

اثر غلظت ZnO بر روی کارایی حذف در سیستم مورد مطالعه : در یک محلول با مقدار ثابت سوبسترا با افزایش دوز کاتالیست تعداد سایت های فعال بر روی کاتالیست افزایش یافته که باعث افزایش به دام انداختن UV شده و در نتیجه افزایش جذب Cr (VI) و نهایتاً افزایش سرعت احیای نوری می‌گردد. چنین پدیده مشابهی نیز توسط چاکرابارت[1] و داس[2] نیز گزارش گردیده است [۲،۱۶].

تأثیر UV/H_2O_2 بر میزان حذف Cr(VI): با افزایش pH، کاهش غلظت اولیه Cr (VI)، افزایش دوز H_2O_2 و کاهش زمان پرتودهی راندمان حذف کروم افزایش پیدا می‌کرد. H_2O_2 از نظر ترمودینامیکی ناپایدار بوده و با افزایش درجه حرارت به آب و اکسیژن تبدیل خواهد شد:

$$2H_2O_2 = 2H_2O + O_2 \qquad \Delta H = -99\ kJ\ mol^{-1}$$

بنابراین با افزایش تابش UV هیدروژن پراکسید از بین خواهد رفت و راندمان پایین می‌آید.

پتانسیل الکترود استاندارد برای واکنش های زیر نشان می‌دهد که H_2O_2 یک اکسید کننده قوی بود که همچنین می‌تواند به عنوان یک احیاء کننده در حضور اکسید کننده های خیلی قوی عمل کند:

$$H_2O_2 + 2H^+ + 2e = 2H_2O \qquad E_0 = 1.77\ V$$
$$O_2 + 2H^+ + 2e = H_2O_2 \qquad E_0 = 0.68\ V$$

از آنجای که پتانسیل استاندارد دی کرومات پتاسیم V ۱/۳۳ می‌باشد بنابراین هیدروژن پراکسید در حضور آن به عنوان یک احیا کننده عمل می‌کند:

$$E^0_{reaction} = E^0_{reduction} - E^0_{oxidation}$$
$$E^0_{reaction} = ۱.۳۳-(-۰.۶۸) = 1.98\ V$$

بنابراین واکنش به سمت راست پیش خواهد رفت [۱۷].

هنگامی که از فرایند اکسیداسیون پیشرفته UV/H_2O_2 استفاده می‌گردد رادیکال هیدروکسیل(OH^-) تشکیل می‌شود که یک اکسید کننده خیلی قوی با پتانسیل استاندارد V ۲/۸۰ می‌باشد. از آنجایی که قدرت اکسید کنندگی رادیکال هیدروکسیل بیشتر از دی کرومات پتاسیم می‌باشد بنابراین احیای کروم صورت نگرفته و با افزایش تابش UV میزان تولید رادیکال بیشتر شده و از واکنش احیای کروم جلوگیری می‌کند. چون واکنش کروم با هیدروژن پراکسید سریع می‌باشد، با تابش UV به آن واکنش به حالت اولیه بر خواهد گشت.

احیای کروم توسط فرایند نانوفتوکاتالیستی (UV/TiO_2)

همانطوری که در مورد ZnO بیان گردید، با افزایش pH و غلظت اولیه کروم میزان حذف کروم کاهش پیدا می‌کند. محدوده دوز TiO2 مورد استفاده بین g/L ۰/۱۵-۰/۰۵ بود. با توجه به اینکه pH_{zpc} نانوذره TiO_2 در محدوده ۰/۰۵ ± ۷/۵۲ می‌باشد بنابراین راندمان در pHهای اسیدی بالاتر نسبت به خنثی و بازی خواهد بود.

نتیجه گیری

حذف فتوشیمیایی و فتوکاتالیستی Cr (VI) با افزایش مقدار هیدروژن پراکسید و نانوذرات ZnO و TiO_2 افزایش می‌یابد. با افزایش H_2O_2 الکترون‌های در دسترس برای احیای کروم افزایش پیدا می‌کند و همچنین با افزایش نانوذرات تولید الکترون‌های آزاد در باند رسانا افزایش پیدا می‌کند. فرایند احیای کروم با افزایش pH کاهش پیدا می‌کند که علت آن افزایش بارهای منفی بر روی کاتالیست می‌باشد. در pH های پایین همچنین به علت تشکیل $HCrO_4$و$H_2CrO_4^-$ و واکنشH_2O_2 با آن احیای کروم افزایش پیدا می‌کند. حذف Cr (VI) با افزایش غلظت اولیه سوبسترا به علت افزایش به دام افتادن UV توسط سوبسترا کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش غلظت کروم تعداد سایت‌های فعال برای عمل احیاء کاهش پیدا می‌کند.

1- Chakrabart
2- Das

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

References

1. Khalil LB, Mourad WE, Rophael MW, Photocatalytic reduction of environmental pollutant Cr(VI) over some semiconductors under UV/visible light illumination. Applied Catalysis B : Environmental. 1998 ; 17 : 267- 73.
2. Chakrabarti S, Chaudhuri B, Bhattacharjee S, Ray AK, Dutta BK. Photo-reduction of hexavalent chromium in aqueous solution in the presence of zinc oxide as semiconductor catalyst. chemical Engineering Journal 2009 ; 153 : 86- 93.
3. Gupta S, Babu BV. Adsorption of Chromium (VI) by a Low-Cost Adsorbent Prepared from Tamarind Seeds. Proceedings of International Symposium & 59th Annual Session of IIChE in association with International Partners (CHEMCON-2006), GNFC Complex, Bharuch. 2006.
4. Nameni M, Alavi Moghadam MR, Arami M, Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solutions by wheat bran, Int J Environ Sci Tech 2008;5(2):161-8.
5. Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. journal of Environmental Management. 2010;92:407-418.
6. Nameni M, Alavi Moghadam MR, Arami M. Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solutions by wheat bran, Int. J. Environ. Sci. Tech. 2008;5(2):161-168.
7. Rahmani AR, Norozi R, Samadi MT, Afkhami A, Hexavalent Chromium Removal from Aqueous Solutionby Produced Iron Nanoparticles, Iran. J. Health & Environ 2009;1(2):67-74.
8. Ku Y, Jung I-L. Photocatalytic reduction of Cr (VI) in aqueous solution by UV irradiation with the precens of titanium dioxide, Wat. Res. 2001;35:135-142.
9. Gherbi R, Nasrallah N, Amrane A, Maachi R, Trari M. Photocatalytic reduction of Cr (VI) on the new hetero-system CuAl2O4/TiO2, Journal of Hazardous Materials 2011 ; 186 : 1124– 1130.
10. Shao D, Wang X, Qiaohui F, Photocatalytic reduction of Cr (VI) to Cr (III) in solution containing ZnO or ZSM-5 zeolite using oxalate as model organic compound in environment, Microporous and Mesoporous Materials 2009 ; 117 : 243– 248.
11 . APHA, AWWA, WEF, Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed., American Public Health Association, Washington, 2005, DC, pp. 3-65–3-68.
12. Ku Y, Jung I-L, Photocatalytic reduction of Cr (VI) in aqueous solution by UV irradiation with the precens of titanium dioxide. Wat Res. 2001;35:135-42.
13. Domenech J, Munoz J, Photocatalytical reduction of Cr(VI) over ZnO powder. Electrochimica Acta. 1987;32:1383-6.
14. Tuprakay S, Liengcharernsit W. Lifetime and regeneration of immobilized titania for photocatalytic removal of aqueous hexavalent chromium, Journal of Hazardous Materials B 2005;124:53–58.
15. Wesolowski DJ, Bénézeth P, Palmer DA, ZnO solubility and Zn21 complexation by chloride and sulfate in acidic solutions to 290°C with in-situ pH measurement, Geochimica et Cosmochimica Acta. 1998;62:971-984.
16. Das DP, Parida K, De BR, Photocatalytic reduction of hexavalent chromium in aqueous solution over titania pillared zirconium phosphate and titanium phosphate under solar radiation, Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 2006;245:217–224.
17. Niekerk WV, Pienaar J, Lachmann G, Eldik Rv, Hamza M, A kinetic and mechanistic study of the chromium (VI) reduction by hydrogen peroxide in acidic aqueous solutions, Water SA 2007;33:619-626.

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]