

# BRIEF REPORT

## **Degradation of 4-chlorophenol by sunlight using catalyst of zinc oxide**

Ramazan-Ali Dianati-Tilaki<sup>1</sup>,  
Mohammad-Ali Zazoli<sup>1</sup>,  
Jamshid Yazdani<sup>2</sup>,  
Mahdieh Alamgholilu<sup>3</sup>,  
Ehsan Rostamali<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, Health Sciences Research Center, School of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Biostatistics, School of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

<sup>3</sup> MSc Student of Environmental Health Engineering, Student Research Committee, School of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

(Received November 30, 2013; Accepted February 23, 2014)

### **Abstract**

**Background and purpose:** Chrophenols represent one of the most abundant toxic compounds of industrial which are resistant to biodegradation and persist in the environment for long time. Sunlight is the source of many photochemical reactions. The present study aimed to determine degradation of 4-chlrophenol as persistent organic compound by sunlight in the presence of zinc oxide as a catalyst.

**Materials and methods:** This study was performed in batch conditions. Determined amount of catalyst was added to defined volume of 4-chlorophenol solution which was adjusted pH. Effects of parameters such as ZnO loading, PH, and contact time were investigated. The remaining concentrations of 4-chlorophenol were analyzed by HPLC (high-performance liquid chromatography).

**Results:** The results showed that sunlight in present of zinc oxide as nanocatalyst lead to almost 75% degradation of 4-chlorophenol in optimum conditions (zinc oxide loading = 1.5 g/l, alkalin pH). Zinc Oxide loses photocatalytic property in acidic pH.

**Conclusion:** Sunlight using catalyst of zinc oxide lead to degradation of persistent organic compounds significantly. The catalyst is not consumed and reusable.

**Keywords:** 4-chlorophenol, sunlight, decomposition

J Mazand Univ Med Sci 2014; 23(Suppl 2): 196-201 (Persian).

## تجزیه ۴-کلروفنل به وسیله نور خورشید با استفاده از کاتالیزور اکسید روی

رمضانعلی دیاتی تیلکی<sup>۱</sup>

محمدعلی زژولی<sup>۱</sup>

جمشید یزدانی<sup>۲</sup>

مهدیه علم قلیلو<sup>۳</sup>

احسان رستمعلی<sup>۳</sup>

### چکیده

**سابقه و هدف:** کلروفنل‌ها یکی از فراوان‌ترین ترکیبات سمی صنایع هستند که نسبت به تجزیه بیولوژیکی مقاوم و مدت زمان طولانی در محیط پایدار مانند. نور خورشید به عنوان یک منبع قادر است انرژی موردنیاز بسیاری از واکنش‌های فتوشیمیایی را تأمین نماید. هدف از این تحقیق، تعیین میزان تجزیه ترکیب آلی مقاوم ۴-کلروفنل به وسیله نور خورشید در حضور اکسید روی به عنوان کاتالیزور بود.

**مواد و روش‌ها:** مطالعه حاضر به صورت ناپیوسته انجام گرفت. حجم مشخصی از محلول ۴-کلروفنل پس از تنظیم pH همراه با مقادیر معینی از کاتالیزور به ظروف شیشه‌ای درب‌دار ریخته شد تا فرایند تجزیه در ساعات میانی روز زیر تابش مستقیم نور خورشید انجام گیرد. برای تماس مؤثر بین کاتالیزور و محلول، از دستگاه همزن استفاده گردید. در این مطالعه تأثیر عواملی مانند دوز کاتالیزور، pH و زمان تماس بررسی شد. برای تعیین غلظت باقی مانده ۴-کلروفنل، دستگاه HPLC (High-performance liquid chromatography) مورد استفاده قرار گرفت.

**یافته‌ها:** نور خورشید با استفاده از نانوکاتالیزور اکسید روی در شرایط بهینه به دست آمده (دوز کاتالیزور ۱/۵ گرم بر لیتر و pH قلیایی) قادر به حذف نزدیک به ۷۵ درصد ۴-کلروفنل بود. در مقادیر pH اسیدی، نانوذره اکسید روی خاصیت فتوکاتالیزوری خود را از دست می‌دهد.

**استنتاج:** خورشید به عنوان منبع انرژی در حضور کاتالیزور می‌تواند منجر به کاهش قابل ملاحظه آلاینده آلی مقاوم ۴-کلروفنل گردد. کاتالیزور مصرف نمی‌شود و قابل استفاده مجدد است.

**واژه‌های کلیدی:** نور خورشید، ۴-کلروفنل، تجزیه

و بنابراین با ورود به منابع آب و جذب در رسوبات کف برای

مدت‌های طولانی در محیط پایدار باقی می‌مانند (۴). ۴-کلروفنل با فرمول شیمیایی  $C_6H_5ClO$  یکی از مشتقات فنل است که از طریق منابع مختلف وارد محیط می‌شود و اثرات سوء متعددی ایجاد می‌کند. اثرات سمی ترکیبات فنلی روی انسان شامل استفراغ، دشواری در بلع، کم‌اشتهاایی، صدمات

### مقدمه

کلروفنل‌ها در پالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمیایی، صنایع دارویی و تولید حشره‌کش‌ها و علف‌کش‌ها، صنایع تولید کننده عوامل ضد میکروبی محیط و حفاظت از چوب و... کاربرد دارند و وارد محیط زیست می‌شوند (۱-۳). کلروفنل‌ها به شدت توسط رسوبات رودخانه‌های پذیرنده جذب می‌شوند

E-mail: alam.mah67@yahoo.com

**مؤلف مسئول: مهدیه علم قلیلو-** ساری: بلوار ولی عصر، جنب مجتمع طبی، خواجه‌نیسی.

۱. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۲. استادیار، گروه آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت، دانشکده تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۹ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۳۹۲/۱۱/۲ تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۱۲/۴

شیشه‌ای درب دار ریخته، مقادیر مشخصی از کاتالیست به آنها اضافه شد تا فرایند زیر تابش مستقیم نور خورشید انجام گیرد. برای تماس مؤثر بین کاتالیست و محلول از دستگاه همزن استفاده شد. قبل از شروع فرایند، محلول تهیه شده به مدت ۳۰ دقیقه در محیط تاریک هم زده شد تا به تعادل برسد (۹). آزمایش‌ها در مرداد سال ۱۳۹۲ از ساعت ۱۰:۳۰ صبح تا ۱۵:۳۰ بعدازظهر در شهر ساری و در محل دانشگاه علوم پزشکی مازندران انجام گرفت. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل دوز کاتالیست (۰،۰۵-۰،۱۰ گرم بر لیتر)، pH (برابر با ۷،۵ و ۱۱) و زمان تماس (۱۵-۳۰۰ دقیقه) بود. در زمان‌های مختلف از محلول نمونه برداشته شد و به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه سانتی‌فیوز با قدرت ۱۴۰۰ دور در دقیقه قرار گرفت و سپس با فیلتر غشایی سرنگی ۰/۲ میکرون فیلتر گردید. تحلیل غلظت‌های استاندارد و مجهول توسط دستگاه HPLC instrument (Knauer HPLC instrument) با فاز (High-performance liquid chromatography) معکوس و ستون C<sub>18</sub> فاز متحرک ۳۰ درصد آب و ۷۰ درصد استونیتریل و دتکتور UV در طول موج ۲۸۰ نانومتر صورت گرفت. نمایی از رآکتور مورد استفاده در این آزمایش در تصویر شماره ۲ آمده است.

## یافته‌ها و بحث

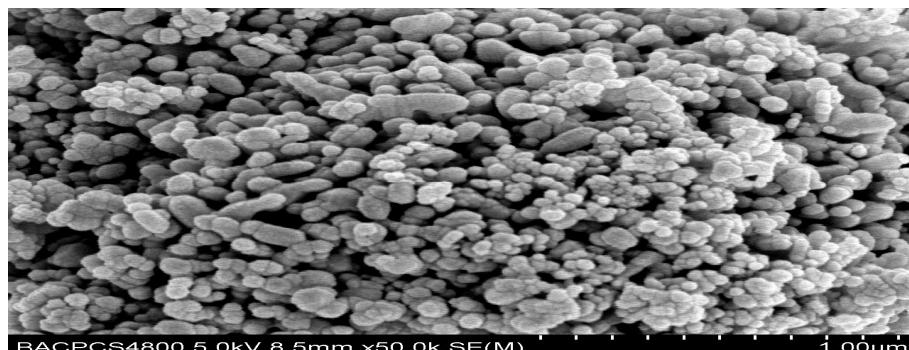
اثر دوز نانوذره اکسید روی برکارایی حذف ۴-کلروفنل مقدار کاتالیست عامل مهمی در فرایند فتوکاتالیستی است. برای تعیین دوز بهینه ZnO مقادیر مختلف کاتالیست (۰،۰۵-۰،۱۰ گرم بر لیتر) در pH خشی به محلول حاوی ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر ۴-کلروفنل اضافه شد. نمودار شماره ۱ نشان می‌دهد که با افزایش دوز کاتالیست، کارایی حذف افزایش می‌یابد و زمانی که به مقدار ۱/۵ گرم در لیتر می‌رسد، کارایی حذف نیز به بیشترین میزان خود (۷۰ درصد) می‌رسد؛ ولی با افزایش دوز کاتالیست از مقدار ۱/۵ گرم بر لیتر، کارایی تا حدودی کاهش یافت که می‌تواند به دلیل کدورت ایجاد شده توسط خوش‌های کاتالیست باشد و موجب کاهش نفوذ پرتو خورشید و افزایش اثر پراکنده‌گی نور خورشید می‌گردد (۱۲، ۱۳).

کلیوی و کبدی و آسیب‌های ذهنی می‌باشد. بیشترین حد مجاز غلظت مشتقات فنل در آب آشامیدنی بر اساس استاندارد اتحادیه اروپا برابر با ۰/۵ میکرو گرم بر لیتر و در استاندارد آمریکا ۱ میکرو گرم بر لیتر تعیین شده است (۵-۷). با توجه به محدودیت‌های موجود در روش‌های دیگر تصفیه مانند کارایی تجزیه بسیار کم در روش‌های بیولوژیکی و نیاز به مواد و روش‌های پیچیده و هزینه بالا، لزوم یافتن روش‌های ارزان‌تر و سازگارتر با محیط زیست مورد توجه محققان قرار گرفته است (۸، ۹). نانوذرات اکسید روی (ZnO) ترکیبی ارزان، ایمن و سالم با ویژگی جذب پرتو الکترومغناطیسی در طول موج بالا و نزدیک نور مرئی می‌باشد. این کاتالیست دارای باند گپ ۳/۲ الکترون ولت است و تحت تابش پرتو در محدوده طول موج ۴۰۰-۲۰۰ نانومتر، حتی در طول نور مرئی قابل تحریک است. این ماده در محدوده طول موج ۳۸۵-۳۶۰ نانومتر، بیشترین میزان جذب را نشان می‌دهد (۹). بزرگ‌ترین مزیت اکسید روی این است که بخش بزرگی از طیف خورشیدی را جذب می‌کند و جذب کوانتم نور بیشتری را نسبت به دیگر نانوذرات متداول مانند TiO<sub>2</sub> دارد (۱۰). هدف از تحقیق حاضر، تعیین تجزیه ماده آلی مقاوم ۴-کلروفنل در محیط‌های آبی به وسیله نور خورشید در حضور نانوذره اکسید روی و تأثیر پارامترهای مختلف بر این فرایند بود.

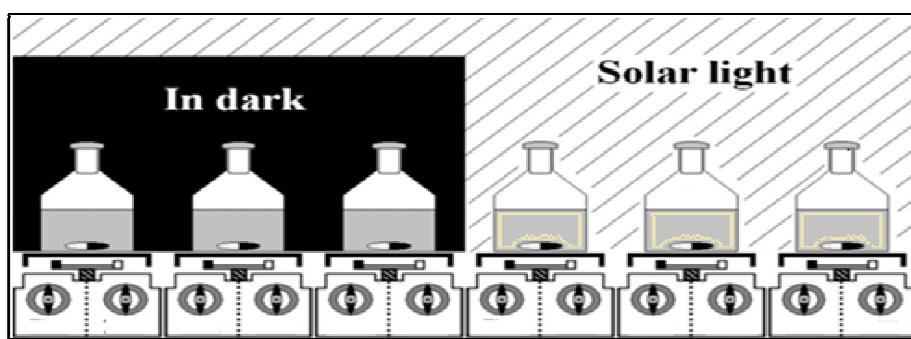
## مواد و روش‌ها

درصد خلوص ۹۹ درصد، اندازه ذرات ۱۰-۳۰ نانومتر، سطح ویژه ۲۰-۶۰ مترمربع در گرم، چگالی ۵/۶۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، رنگ سفید مایل به زرد و شکل نزدیک به کروی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانوذره اکسید روی بود. تصویر شماره ۱، نمایی از نانوذره اکسید روی در میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning electron microscope) (SEM) یا (SEM) را نشان می‌دهد.

برای انجام آزمایش‌ها، محلول ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر ۴-کلروفنل (مطابق با بیشترین مقدار تخلیه در فاضلاب‌های صنعتی) تهیه شد (۱۱). از این محلول ۵۰ میلی لیتر در ظروف



تصویر شماره ۱: نمای (Scanning electron microscope) SEM (نانوذره اکسید روی)



تصویر شماره ۲: روش انجام آزمایش‌ها

نمودار شماره ۱: راندمان حذف ۴-کلروفنل طی فرایند Sunlight/ZnO در دوزهای مختلف اکسید روی  
(زمان: ۵ ساعت، غلظت اولیه ۴-کلروفنل: ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر و pH خشی)

با استفاده از کاتالیزور سنتزی اکسید لاتانیوم-اکسید تیتانیوم به نسبت‌های مختلف انجام شد، راندمان تجزیه بین ۴۰-۸۰ درصد بسته به نوع ترکیب درصد کاتالیست حاصل شد (۱۴). در پژوهشی به منظور تصوفیه فاضلاب حاوی ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر ماده ۴-کلروفنل، روش تلفیقی فتوکاتالیستی با استفاده از نور UV و بیولوژیک انجام شد و

در تحقیقی که به منظور تجزیه ماده ۴-کلروفنل با غلظت ۲۰ میلی گرم بر لیتر با استفاده از نور خورشید در حضور کاتالیزور دی اکسید تیتانیوم به میزان ۱ گرم بر لیتر انجام شد؛ بیشترین راندمان تجزیه ۸۰ درصد و در مدت زمان تماس ۴ ساعت گزارش گردید (۲). در تحقیق دیگری که درباره اکسیداسیون فتوکاتالیستی ۴-کلروفنل تحت تابش نور مرئی

گردید، گزارش شد که تجزیه این ماده در شرایط اسیدی قوی ( $pH < 4$ ) به دلیل انحلال اکسید روی متوقف می شود (۱۳). در تحقیقی که توسط دهقانی فرد و همکاران انجام گرفت؛ مشخص شد که با افزایش  $pH$ ، کارایی حذف آنلیین توسط فرایند فتوکاتالیستی با نانوذره اکسید روی افزایش می یابد که این امر به دلیل تشکیل سریع تر و بیشتر رادیکال های آزاد هیدروکسیل می باشد و با مطالعه حاضر همخوانی دارد (۱۶).

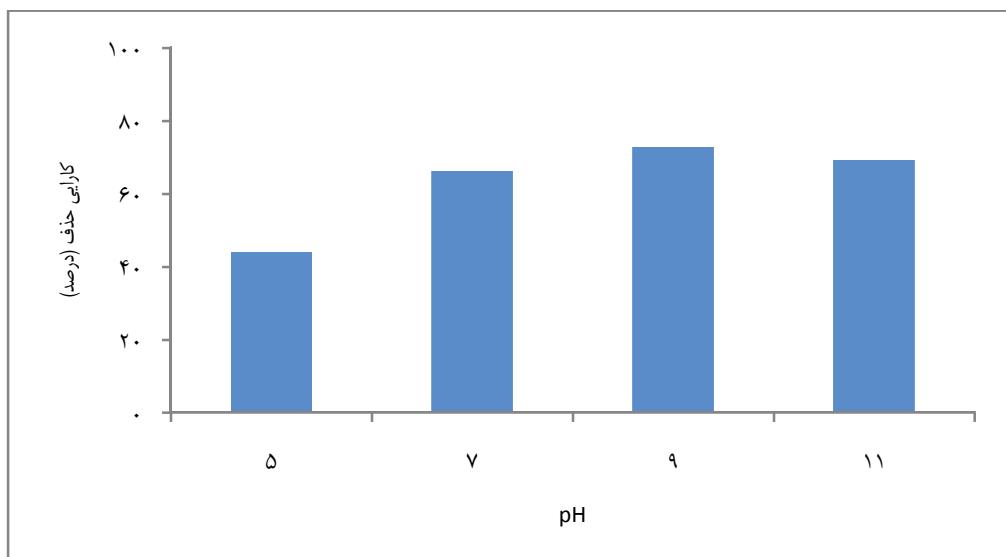
تغییرات راندمان حذف ۴-کلروفنل نسبت به زمان در شرایط بهینه فرایند فتوکاتالیستی زمان ماند، یکی از متغیرهای مؤثر در افزایش عملکرد سیستم های فتوکاتالیستی است. نتایج مطالعه بیانگر آن است که با افزایش زمان ماند، راندمان حذف آلاینده افزایش یافت؛ ولی با گذشت زمان، روند افزایشی راندمان حذف آلاینده کاهش پیدا کرد. این امر را می توان به دلیل تجزیه سریع آلاینده در ۳ ساعت ابتدای فرایند توسط رادیکال های آزاد تولید شده ناشی از برانگیختگی الکترونی نانوذرات اکسید روی دانست. با افزایش زمان ماند، اگرچه روند برانگیختگی نانوذرات اکسید روی و تولید رادیکال های آزاد

قبل از تصفیه بیولوژیک روش تجزیه فتوکاتالیستی با استفاده از کاتالیزور  $TiO_2$  در دوزهای ۱-۶ گرم بر لیتر مورد آزمایش قرار گرفت که راندمان های حذف از ۶۰-۷۵ درصد بسته به غلظت کاتالیست به دست آمد (۱۵).

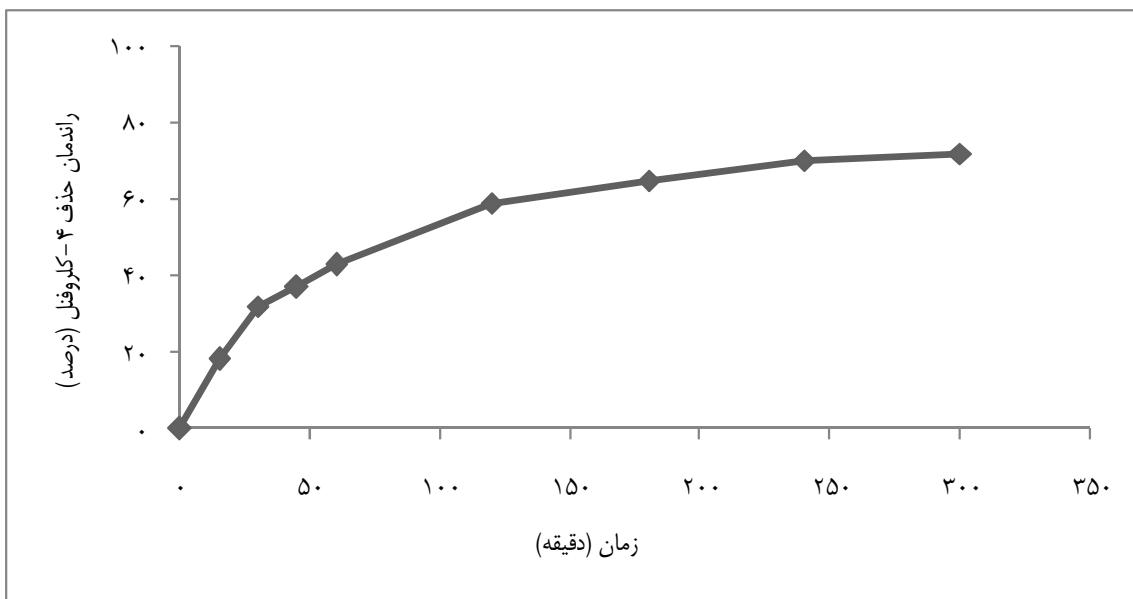
#### اثر $pH$ محلول

جهت بررسی تأثیر  $pH$  محلول، ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر ۴-کلروفنل در  $pH$  های مختلف (برابر با ۵، ۷، ۹ و ۱۱) تهیه شد و مقدار ۱/۵ گرم بر لیتر از کاتالیست به آن اضافه گردید. همان طور که در نمودار شماره ۲ مشاهده می شود، کارایی حذف ۴-کلروفنل در  $pH$  خشی تا قلیایی نسبت به  $pH$  اسیدی بیشتر بود و  $pH$  برابر با ۹ به عنوان  $pH$  بهینه به دست آمد. تغییر  $pH$  محلول منجر به شارژ مثبت یا منفی نانوذرات اکسید روی می شود که در نتیجه بر عملکرد تجزیه ای نانوذرات تأثیر می گذارد (۱۶).

نانوذره اکسید روی در مقدار  $pH$  اسیدی به دلیل از دست دادن اکسیژن خود (در واکنش با یون  $H^+$ ، در آب محلول می شود و در نهایت خاصیت فتوکاتالیستی خود را از دست می دهد (۱۶). در تحقیقی که درباره تجزیه فتوکاتالیزور ۴-کلروفنل با استفاده از اکسید روی انجام



نمودار شماره ۲: تأثیر مقدار  $pH$  بر کارایی حذف ۴-کلروفنل  
(غلظت اولیه ۴-کلروفنل: ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر و دوز اکسید روی: ۱/۵ گرم بر لیتر)



نمودار شماره ۳: تغییرات راندمان حذف ۴-کلروفنل نسبت به زمان طی فرایند فتوکاتالیستی  $\text{sunlight}/\text{ZnO}$   
(غلظت اولیه ۴-کلروفنل: ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، دوز اکسید روی: ۱/۵ گرم بر لیتر و  $\text{pH} = ۹$ )

کارایی بالایی در حذف کلروفنل‌ها از محیط‌های آبی دارد. عامل اصلی حذف ۴-کلروفنل در این فرایندها، رادیکال‌های هیدروکسیل می‌باشد که یک نوع اکسیدانت غیر گزینشی قوی برای حذف مواد آلی است؛ بنابراین برقراری هر گونه شرایطی که منجر به افزایش تولید رادیکال هیدروکسیل و افزایش مواجهه با مولکول‌های ۴-کلروفنل شود، موجب افزایش راندمان حذف می‌گردد. این فرایند در محیط قلایایی کارایی بیشتری نسبت به محیط‌های اسیدی و خنثی دارد. پس فرایند تجزیه فتوکاتالیستی توسط نانوذره اکسید روی در حضور نور خورشید می‌تواند منجر به کاهش قابل ملاحظه آلاند شدن مقاوم ۴-کلروفنل گردد. از جمله مزایای این فرایند می‌توان به عملکرد بالا، هزینه تصفیه کمتر نسبت به سایر فرایندهای (Advanced oxidation processes) AOPs لجن و راهبری ساده اشاره کرد.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از همکاری و مساعدت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی مازندران در تأمین بودجه تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

هیدروکسیل کاهش نیافت، اما به دلیل تشکیل ترکیبات آلی واسط ناشی از تجزیه آلاند، مقداری از رادیکال‌های آزاد تولید شده صرف تجزیه این ترکیبات گردید و در نتیجه از سرعت حذف آلاند کاسته شد (۱۶). بر اساس نمودار شماره ۳، این فرایند قادر به حذف ۷۵ درصد ۴-کلروفنل بود.

تحقیق مشابهی نشان داد که فرایند تجزیه فتوکاتالیستی  $\text{sunlight}/\text{ZnO}$  قادر است ترکیبات ۲-کلروفنل، ۲، ۴، ۶-تری کلروفنل، ۲ و ۴-دی کلروفنل و پنتاکلروفنل را به طور قابل ملاحظه‌ای تجزیه نماید و می‌تواند جایگزین مناسبی برای دیگر روش‌های تصفیه باشد (۱۷). همچنین تحقیق دیگری که در یک رآکتور فتوالکتروشیمیایی برای تجزیه ترکیبات آلی مقاوم از جمله ۴-کلروفنل در حضور نانوذره اکسید روی و نور خورشید صورت گرفت، بیان داشت که ترکیبات آلی در این رآکتور و در حضور نانوکریستال‌های اکسید روی به طور مؤثری حذف شدند (۱۸).

همان طور که نتایج نشان داد، به کارگیری شرایط بهینه معرفی شده، رآکتور را از کارایی بیشتر در حذف ۴-کلروفنل برخوردار می‌نماید. نتایج محققان دیگر نیز بیانگر این مطلب است که فرایند نانوفتوکاتالیستی در حضور نور خورشید

## References

- Seid Mohammadi A, Movahedian Attar H. P-chlorophenol oxidation in industrial effluent by ultrasonic/fenton technology. *Water and Wastewater* 2011; 22(4): 43-9. (Persian).
- Cheng Y, Sun H, Jin W, Xu N. Photocatalytic degradation of 4-chlorophenol with combustion synthesized TiO<sub>2</sub> under visible light irradiation. *Chemical Engineering Journal* 2007; 128(2-3): 127-33.
- Dixit A, Mungray AK, Chakraborty M. Photochemical Oxidation of Phenol and Chlorophenol by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> Process: A Kinetic Study. *Int J Chem Eng Appl* 2010; 1(3): 247-50.
- Mesdaghinia AR, Farrokhi M, Naseri S, Yazdanbakhsh AR. Biodegradability enhancement of 2,4,6 trichlorophenol (TCP) by fenton's oxidation process. *Hakim Res J* 2004; 7(2): 33-40. (Persian).
- Gholizadeh A, Kermani M, Gholami M, Farzadkia MM. Comparative Investigation of 2-Chlorophenol and 4-Chlorophenol Removal Using Granulated Activated Carbon and Rice Husk Ash. *Toloo e Behdasht* 2013; 11(3): 66-78. (Persian).
- Kermani M, Gholami M, Gholizadeh A, Farzadkia M, Esrafil A. Effectiveness of Rice Husk Ash in Removal of Phenolic Compounds from Aqueous Solutions, Equilibrium and Kinetics Studies. *Iranian Journal of Health* 2012; 5(1): 107-20. (Persian).
- Pera-Titus M, Garcia-Molina V, Banos MA, Giméneza J, Esplugas S. Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review. *Applied Catalysis B: Environmental* 2004; 47(4): 219-56.
- Manshouri M, Yazdanbakhsh AR, Sardar M, Sheykh Mohammadi A. Investigation of Effective Factors for Fenton like Process in Para!Chlorophenol Removal from Aqueous Solutions. *Iranian Journal of Health* 2010; 3(4): 381-8. (Persian).
- Moonsiri M, Rangsuvigit P, Chavadej S, Gulari E. Effects of Pt and Ag on the photocatalytic degradation of 4-chlorophenol and its by-products. *Chemical Engineering Journal* 2004; 97: 241-8.
- Masoumbeigi H, Rezaee A, Khataee AR, Hashemian J. Photocatalytic removal of escherichia coli and streptococcus faecalis from water using immobilized zno nanoparticles. *Qom Univ Med Sci J* 2013; 6(4): 24-35. (Persian).
- Alimoradzadeh R, Assadi A, Nasser S, Mehrasbi MR. Photocatalytic degradation of 4-chlorophenol by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/NiO process in aqueous solution. *Iran J Environ Health Sci Eng* 2012; 9: 12. (Persian).
- Chiou CH, Wu C, Juang RS. Influence of operating parameters on photocatalytic degradation of phenol in UV/TiO<sub>2</sub> process. *Chemical Engineering Journal* 2008; 139(2): 322-9.
- Gaya UI, Abdullah AH, Zainal Z, Hussein MZ. Photocatalytic treatment of 4-chlorophenol in aqueous ZnO suspensions: intermediates, influence of dosage and inorganic anions. *J Hazard Mater* 2009; 168(1): 57-63.
- Cao G, Li Y, Zhang Q, Wang H. Synthesis and characterization of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>-xFx and the visible light photocatalytic oxidation of 4-chlorophenol. *J Hazard Mater* 2010; 178(1-3): 440-9.
- Goel M, Chovelon JM, Ferronato C, Bayard R, Sreekrishnan TR. The remediation of wastewater containing 4-chlorophenol using integrated photocatalytic and biological treatment. *J Photochem Photobiol B* 2010; 98(1): 1-6.
- Dehghani Fard E, Jonidi Jafari A, Rezae Kalantari R, Gholami M, Esrafil A. Photocatalytic Removal of Aniline from Synthetic Wastewater using ZnO Nanoparticle under Ultraviolet Irradiation. *Iran J Health Environ* 2012; 5(2): 167-78. (Persian).
- Ba-Abbad MM, Kadhum AH, Al-Amiry AA, Mohamad AB, Takriff MS. Toxicity evaluation for low concentration of chlorophenols under solar radiation using zinc oxide (ZnO) nanoparticles. *International Journal of the Physical Sciences* 2012; 7(1): 48-52.
- Shinde SS, Shinde PS, Bhosale CH, Rajpure KY. Zinc oxide mediated heterogeneous photocatalytic degradation of organic species under solar radiation. *J Photochem Photobiol B* 2011; 104(3): 425-33.