

## Photocatalytic Degradation of 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid from Aqueous Solutions Using $\text{In}_2\text{O}_3$ Nanoparticles

Mohammad Taghi Ghaneian<sup>1</sup>,  
Asghar Ebrahimi<sup>2</sup>,  
Javad Salimi<sup>3</sup>,  
Rasoul Khosravi<sup>4</sup>,  
Reza Ali Fallahzadeh<sup>4</sup>,  
Mohsen Amrollahi<sup>5</sup>,  
Mahmoud Taghavi<sup>6,7</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Environmental Science and Technology Research Center, Department of Environmental Health Engineering, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Environmental Science and Technology Research Center, Department of Environmental Health Engineering, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

<sup>3</sup> Lecturer, Department of Environmental Health Engineering, Torbat-e Hydarieh University of Medical Sciences, Torbat-e Hydarieh, Iran

<sup>4</sup> PhD Student Environmental Health Engineering, Environmental Science and Technology Research Center, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

<sup>5</sup> MSc in Environmental Health Engineering, Environmental Science and Technology Research Center, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

<sup>6</sup> Lecturer, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Public Health, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran

<sup>7</sup> PhD Student in Environmental Health Engineering, Environmental Science and Technology Research Center, School of Public Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

(Received December 28, 2015 ; Accepted May 1, 2016)

### Abstract

**Background and purpose:** Among the numerous chemicals utilized in agriculture, 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) is widely used to control weeds. This herbicide is considered as a carcinogen and high toxic pollutant which is very difficult to remove due to its biological and chemical stability. This study aimed at photocatalytic degradation of 2,4-D using indium oxide nanoparticles in the presence of ultraviolet light.

**Materials and methods:** This study was carried out in bench scale and batch system. The effect of operating parameters such as pH (2-11), contact time (5-240 min), catalyst dose (0.1-2 g/l) and initial concentration of herbicide (5-40 mg/l) on the efficiency of the process were studied. The experimental data were fitted to a pseudo-first-order kinetic model.

**Results:** Increasing the pH and initial concentration of herbicide led to reduced efficiency while increasing the contact time and catalyst dose increased the efficiency. The best result (70% efficiency) was achieved at pH 3, 1 g/l catalyst dose, 120 min contact time, and 5 mg/l initial concentration. The process data well followed the pseudo-first-order kinetic model ( $R^2 = 0.915$ ).

**Conclusion:** The results demonstrated that the photocatalytic process using indium oxide nanoparticles in the presence of ultraviolet light have a relatively good efficiency in removing 2,4-D.

**Keywords:** herbicide removal, photocatalytic process, Indium nanoparticle, 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid

## تجزیه فتوکاتالیستی علف کش ۲،۴-دی کلرو فنوکسی استیک اسید از محلول های آبی با استفاده از نانوذرات اکسید ایندیوم

محمد تقی قانعیان<sup>۱</sup>اصغر ابراهیمی<sup>۲</sup>جواد سلیمی<sup>۳</sup>رسول خسروی<sup>۴</sup>رضاعلی فلاح زاده<sup>۴</sup>محسن امرالهی<sup>۵</sup>محمود تقوی<sup>۶ و ۷</sup>

### چکیده

**سابقه و هدف:** در میان مواد شیمیایی متعدد مورد استفاده در بخش کشاورزی، ۲،۴-دی کلرو فنوکسی استیک اسید (D-2,4) به طور گسترده‌ای برای کنترل علف‌های هرز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این علف کش به عنوان یک آلاینده سرطان زا و با سمیت بالا در نظر گرفته می‌شود که به دلیل پایداری بیولوژیکی و شیمیایی آن، تجزیه این آلاینده بسیار مشکل است. لذا این مطالعه با هدف تجزیه فتوکاتالیستی علف کش D-2,4 با استفاده از نانوذرات اکسید ایندیوم در حضور نور ماوراء بنفش انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی و در سیستم ناپیوسته انجام شد. اثر پارامترهای عملیاتی نظیر pH (۲-۱۱)، زمان تماس (۵-۲۴۰ دقیقه)، دوز کاتالیست (۲-۰/۱ گرم بر لیتر) و غلظت اولیه علف کش (۵-۴۰ میلی گرم بر لیتر) بر راندمان فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های فرآیند با مدل سینتیکی شبه درجه یک تطبیق داده شدند.

**یافته‌ها:** افزایش pH و غلظت اولیه علف کش منجر به کاهش راندمان تجزیه شد و افزایش زمان تماس و دوز فتوکاتالیست سبب افزایش راندمان تجزیه شد. بهترین راندمان معادل ۷۰ درصد، در pH برابر با ۳، دوز کاتالیست ۱ گرم بر لیتر، زمان تماس ۱۲۰ دقیقه و غلظت اولیه علف کش ۵ میلی گرم بر لیتر حاصل شد. داده‌های فرآیند به خوبی از سینتیک شبه درجه یک پیروی می‌کنند ( $R^2=0.915$ ).

**استنتاج:** نتایج این مطالعه نشان داد که فرآیند فتوکاتالیستی با استفاده از نانوذرات اکسید ایندیوم در حضور نور ماوراء بنفش راندمان نسبتاً مناسبی برای تجزیه علف کش D-2,4 دارد.

**واژه های کلیدی:** تجزیه علف کش، فرآیند فتوکاتالیستی، نانوذرات اکسید ایندیوم، ۲،۴-دی کلرو فنوکسی استیک اسید

### مقدمه

شده در این سال در گیاهان زراعی، حدود ۲۵ درصد  
حشره کش، ۱۶ درصد قارچ کش و ۵۹ درصد علف کش

در ایران در سال ۸۶-۱۳۸۵، حدود ۲۶ میلیون کیلوگرم  
یا لیتر آفت کش مصرف شده است. از کل سموم مصرف

E-mail: taghavi66@yahoo.com

مؤلف مسئول: محمود تقوی؛ زابل: دانشگاه علوم پزشکی زابل، دانشکده بهداشت

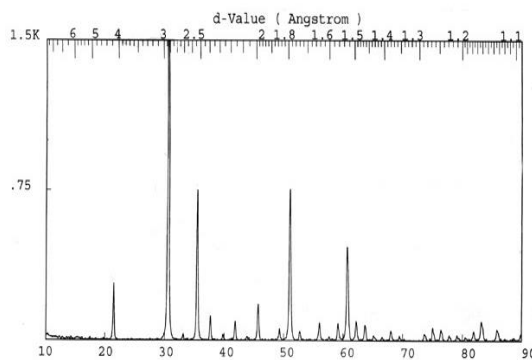
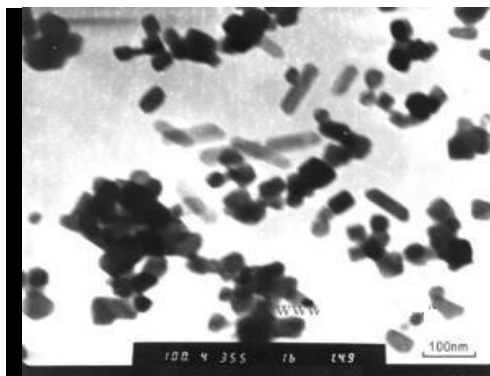
۱. دانشیار، مرکز تحقیقات علوم و فناوری‌های محیط زیست، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت عمومی، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی، یزد، ایران
۲. استادیار، مرکز تحقیقات علوم و فناوری‌های محیط زیست، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت عمومی، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی، یزد، ایران
۳. مربی، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران
۴. دانشجوی دکتری مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم و فناوری‌های محیط زیست، دانشکده بهداشت عمومی، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی، یزد، ایران
۵. کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم و فناوری‌های محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی، یزد، ایران
۶. مربی، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت عمومی، دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران
۷. دانشجوی دکتری مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم و فناوری‌های محیط زیست، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۷ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۳۹۴/۱۰/۱۳ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۲/۱۲

بوده است (۱). علف کش های فنوکسی استیک اسیدهای کلرینه به طور گسترده ای در مقیاس بزرگ در کشاورزی به منظور کنترل رشد علف های هرز پهن برگ در کشتزارهای برنج، گندم و ذرت مورد استفاده قرار می گیرند (۲). در میان مواد شیمیایی متعددی که در بخش کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرد، ۲،۴-دی کلرو فنوکسی استیک اسید (۲،۴-D<sup>۱</sup>) به طور گسترده ای برای کنترل علف های هرز مورد استفاده قرار می گیرد که بعد از استفاده به علت حلالیت زیاد به راحتی به آب های سطحی راه می یابد. آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا حد مجاز این علف کش در آب را ۰/۱ ppm بیان کرده است (۳). سازمان جهانی بهداشت ۷۰ µg/L را به عنوان حداکثر غلظت مجاز ۲،۴-D برای آب آشامیدنی بیان کرده است (۴). تجزیه ۲،۴-D در آب بسیار کند است، نیمه عمر آن در موقعیت های مختلف حدود ۶ تا بیش از ۱۷۰ روز می باشد (۵). سازمانی جهانی بهداشت این علف کش را به عنوان یک آلاینده سرطانزا (گروه II) در نظر گرفته است (۶). تحقیقات متعددی برای تجزیه این آفت کش از آب به روش های بیولوژیکی و فیزیکی - شیمیایی انجام شده است، اما تجزیه این آلاینده به دلیل پایداری بیولوژیکی و شیمیایی آن بسیار مشکل است (۷،۲). تاکنون روش های حذف بسیاری از جمله: جذب، تجزیه بیولوژیکی، فیلتراسیون غشایی، تکنولوژی های تصفیه الکترو شیمیایی و هم چنین تجزیه فوتوکاتالیستی توسط نانو ذرات مورد بررسی قرار گرفته است (۵)، اما این روش ها راندمان ضعیفی برای تجزیه آلاینده های مقاوم نظیر D-۲،۴ نشان داده اند (۲). در سال های اخیر فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته برای برآورده کردن تصفیه موثر فاضلاب توسعه یافته اند (۸). فرآیند تجزیه فوتوکاتالیستی ناهمگن یک فرآیند تصفیه پیشرفته است که می تواند سبب معدنی شدن آلاینده شود (۹). این فرآیند یک روش نسبتاً ارزان با راندمان بسیار بالا می باشد (۱۰).

اکسیداسیون فوتوکاتالیستی آفت کش ها در دهه های اخیر مورد توجه قرار گرفته است (۷). تجزیه علف کش دی کوات توسط نور خورشید در حضور نانوذرات ZnO (۱۱)، تجزیه مکوپروپ و پیکلورام با استفاده از نانوتیوب های تیتانیوم (۱۲)، تجزیه ۲،۴-دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از ترکیب گرافن / TiO<sub>2</sub> مغناطیسی (۷)، جذب و تجزیه ایزوپروتورن با استفاده از مواد هیبریدی TiO<sub>2</sub> / کربن (۱۳) و تجزیه علف کش های بر پایه پیریدین با استفاده از تیتانیای دوپ شده (۱۴) از نمونه های کاربرد فرآیند اکسیداسیون فوتوکاتالیستی در تجزیه علف کش ها می باشند. تجزیه فوتوکاتالیستی آفت کش ۲،۴-D نیز با استفاده از نانوذرات دی اکسید تیتانیوم تجاری و تولید شده به روش سل-ژل (۱۵)، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم / اشعه ماوراء بنفش / کربن فعال (۱۶)، نانوبلورهای دی اکسید تیتانیوم تولید شده به روش سل-ژل (۱۷) و گلوله های شبه قارچ سفید متخلخل TiO<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> (۱۸) مورد بررسی قرار گرفته است. از سوی دیگر راندمان فرآیند فوتوکاتالیستی با استفاده از ترکیب نانوذرات TiO<sub>2</sub>/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در تجزیه متیل نارنجی (۱۹)، نانو ذرات MgO/ZnO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در تجزیه متیلن آبی (۲۰) و استفاده از نانو ذرات TiO<sub>2</sub>/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در تجزیه کنگو رد (۲۱) مورد بررسی قرار گرفته است. با وجود مزایای ذکر شده برای فرآیندهای فوتوکاتالیستی، این فرآیند معایبی نیز دارد که از بین آن ها می توان به تجمع و گلوله شدن نانوذرات در غلظت های بالا، نیاز به فیلتراسیون و جداسازی نانوذرات بعد از فرآیند و زمان بر شدن فرآیند، مشکل بودن کاربرد فوتوکاتالیست به صورت معلق در فرآیندهای با جریان پیوسته، نیاز به انرژی بالا در صورت استفاده از نور UV و مسائل و مشکلات مربوط به ایمنی کاربرد این اشعه و محدود بودن میزان استفاده از نور خورشید به دلیل پایین بودن کارایی نوری نانوذرات موجود اشاره کرد (۲۲-۲۴)، اگرچه که در برخی موارد سبب تولید آلاینده های واسط نیز می شود (۱۳). کاربرد این تکنولوژی به محلول های با غلظت آلاینده

1. 2,4 -Dichlorophenoxyacetic Acid



تصویر شماره ۱: تصویر SEM و نتایج آزمایش XRD نانوذرات اکسید ایندیوم

#### آزمایشات ناپیوسته

این تحقیق یک مطالعه تجربی-کاربردی است که در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. به منظور انجام آزمایشات، محلول استوک علف کش ۲،۴-دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از پودر خالص آن در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر تهیه شد و جهت تهیه غلظت‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل pH (۲-۱۱)، دوز فتوکاتالیست (۲-۰/۱ گرم بر لیتر)، زمان تماس (۵-۲۴۰ دقیقه) و غلظت اولیه علف کش (۵-۴۰ میلی گرم بر لیتر) بوده است (۲۸) و در مجموع تعداد ۴۰ نمونه با دو بار تکرار مورد آزمایش قرار گرفته است. در هر مرحله از تحقیق، در حالی که سایر پارامترها در یک مقدار ثابت نگه داشته شده، اثر یک پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تامین اشعه ماورای بنفش از دو لامپ UV کم فشار ۱۱ وات (UV-C) با شدت تابش ۲۴ میکرووات بر

پایین محدود می‌شود (۱۵). اکسید ایندیوم متعلق به گروهی از اکسیدهای فلزی با باند گپ پهن می‌باشد که کاربردهای بسیاری از جمله سلول‌های خورشیدی، سنسورهای گاز، الکترونیک نوری و فتوکاتالیستی دارد. اکسید ایندیوم با باند گپ پهن  $3/6 \text{ eV}$  یک نیمه هادی مهم می‌باشد (۲۵). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که نانوذرات اکسید ایندیوم می‌توانند کاتالیست موثری در حذف آلاینده‌های آلی باشند (۲۶). با این وجود اطلاعات کمی در رابطه با کاربرد نانوذرات اکسید ایندیوم در تجزیه آلاینده‌ها با استفاده از فرآیند فتوکاتالیستی وجود دارد. لذا این مطالعه با هدف بررسی میزان تجزیه فتوکاتالیستی علف کش ۲،۴-دی کلرو فنوکسی استیک با استفاده از نانوذرات اکسید ایندیوم در حضور نور ماوراء بنفش انجام شد.

## مواد و روش‌ها

### مواد مورد استفاده

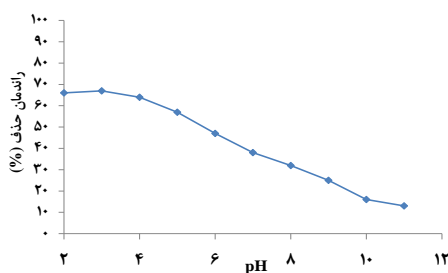
علف کش D-۲،۴ مورد استفاده در این تحقیق از شرکت مرک آلمان با درصد خلوص ۹۸ درصد تهیه شد که مشخصات آن در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول شماره ۱: مشخصات علف کش مورد مطالعه (۲۷)

نام ترکیب	ساختار	وزن ملکولی	حلالیت در آب (mg/l)	pK <sub>a</sub> (در ۲۹۸/۱۵k)
۴،۲-دی کلرو فنوکسی استیک اسید (D-۲،۴)		۲۲۱،۰۴	۱۰۷۲	۲/۸

سایر مواد شیمیایی مورد استفاده نظیر هیدروکلریک اسید و سود از شرکت مرک خریداری شدند. نانوذرات اکسید ایندیوم از شرکت US Research Nanomaterials خریداری شد. شکل شماره ۱ تصویر SEM و نتایج آزمایش XRD نانوذرات اکسید ایندیوم ارائه شده توسط شرکت سازنده را نشان می‌دهد. فیلتر سر سرنگی (MCE membrane, 0.22  $\mu\text{m}$ ) از شرکت بایوفیلتر<sup>۱</sup> تهیه شد.

را تغییر دهد که منجر به تغییر فعالیت فتوکاتالیستی شود (۳۱). تاثیر pH بر راندمان تجزیه علف کش ۲,۴-D با استفاده از نانوذرات اکسید ایندیوم در حضور نور ماوراء بنفش مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در نمودار شماره ۱ آورده شده است. نتایج نشان داد با افزایش pH، راندمان تجزیه کاهش می‌یابد، به طوری که بالاترین راندمان در pHهای اسیدی به دست آمد. بالاترین راندمان تجزیه در pH برابر با ۳ و حدود ۶۷ درصد به دست آمد.

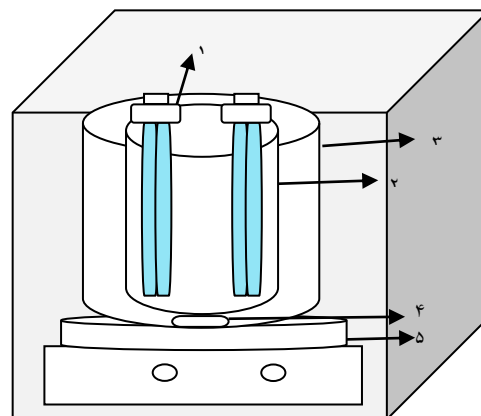


نمودار شماره ۱: تاثیر pH بر راندمان تجزیه علف کش ۲,۴-دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$  (دوز نانوذره: ۰/۸ گرم بر لیتر، زمان تماس: ۱۲۰ دقیقه و غلظت اولیه علف کش: ۱۰ میلی گرم بر لیتر)

#### اثر دوز کاتالیست

اثر دوز کاتالیست بر راندمان تجزیه علف کش ۲,۴-دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$  در محدوده ۰/۱ تا ۲ گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت. نمودار شماره ۲، تاثیر دوز کاتالیست بر راندمان تجزیه علف کش ۲,۴-دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$  را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش دوز نانوذره، راندمان تجزیه افزایش می‌یابد. این افزایش راندمان در ابتدا با سرعت بیش‌تری اتفاق می‌افتد و با افزایش بیش‌تر دوز نانوذره، افزایش راندمان تجزیه با سرعت کم‌تری مشاهده می‌شود. بالاترین راندمان تجزیه در دوز نانوذره برابر با ۱ گرم بر لیتر مشاهده می‌شود. با افزایش بیش‌تر دوز نانوذره، کاهش ناچیزی در راندمان تجزیه مشاهده می‌شود.

سانتی متر مربع استفاده شد. جهت انجام آزمایشات ناپیوسته، از محلول استوک ساخته شده، غلظت‌های مشخص از علف کش تهیه و به داخل ظرف شیشه‌ای انتقال داده شد. سپس pH نمونه‌ها تنظیم شد و مقدار مشخصی نانوذره به آن اضافه شد و بر روی همزن مغناطیسی با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه، تحت تابش پرتو ماورای بنفش قرار داده شد. پس از طی زمان تماس مورد نظر، به منظور جداسازی نانوذرات نمونه‌ها از فیلترهای ۰/۲۲ میکرون عبور داده شدند (۲۹، ۳۰) و مقدار علف کش در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. برای تنظیم pH از هیدروکلریک اسید و سود ۰/۱ مولار و برای سنجش pH، از دستگاه pH متر مدل mi151 استفاده گردید. از دستگاه اسپکتروفتومتری (UV-vis HACH, model DR 5000) برای سنجش غلظت علف کش ۲,۴-دی کلرو فنوکسی استیک اسید در طول موج ۲۸۴ نانومتر استفاده شد (۶). تصویر شماره ۲ طرح شماتیک راکتور مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.



تصویر شماره ۲: طرح شماتیک راکتور فتوکاتالیستی مورد استفاده: ۱- لامپ UV، ۲- پوشش کوآرتز، ۳- محفظه واکنش، ۴- مغنت، ۵- همزن مغناطیسی

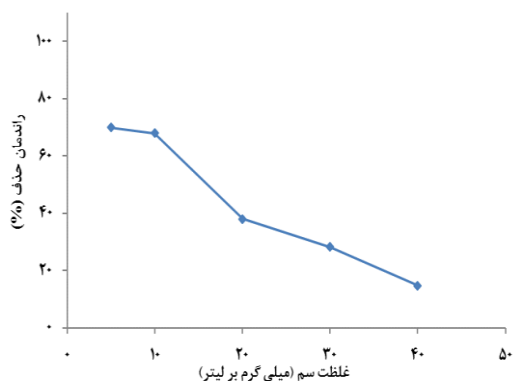
## یافته‌ها

### اثر pH

pH یکی از پارامترهای مهم در فرآیند فتوکاتالیستی است، زیرا ممکن است خصوصیات سطحی فتوکاتالیست

### اثر غلظت اولیه علف کش

تأثیر غلظت اولیه علف کش بر راندمان تجزیه علف کش ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$  در محدوده ۵ تا ۴۰ میلی گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت. نمودار شماره ۴ اثر غلظت اولیه علف کش بر راندمان تجزیه علف کش ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$  را نشان می دهد. با افزایش غلظت اولیه علف کش، راندمان تجزیه فرآیند فتوکاتالیستی با استفاده از  $UV/In_2O_3$  کاهش می یابد. به طوری که با افزایش غلظت اولیه علف کش از ۵ میلی گرم بر لیتر به ۴۰ میلی گرم بر لیتر، راندمان تجزیه از ۷۰ درصد به ۱۴/۷۵ درصد می رسد.



نمودار شماره ۴: تأثیر زمان تماس بر راندمان تجزیه علف کش ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$  (دوز نانوذره: ۱ گرم بر لیتر، ۳ pH و زمان تماس: ۱۲۰ دقیقه)

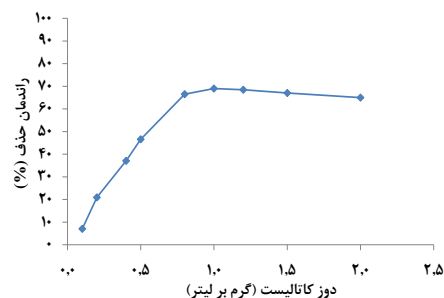
### سینتیک فرآیند

به منظور تعیین سرعت و درجه واکنش فتوکاتالیستی علف کش ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/S_2O_8$ ، داده های به دست آمده با سینتیک شبه درجه یک تطبیق داشت که معادله آن به صورت زیر است:

$$\frac{d[2-4-D]}{dt} = k[2-4-D] \quad \text{معادله ۱ (۳۲)}$$

و

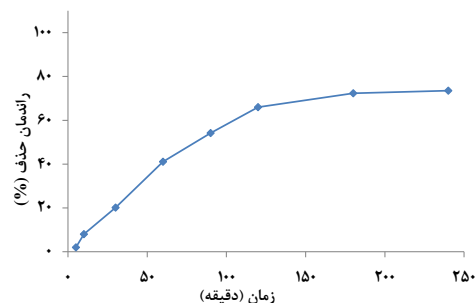
$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -kt \quad \text{معادله ۲ (۳۲)}$$



نمودار شماره ۲: تأثیر دوز کاتالیست بر راندمان تجزیه علف کش ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$  (pH: ۳، زمان تماس: ۱۲۰ دقیقه و غلظت اولیه علف کش: ۱۰ میلی گرم بر لیتر)

### اثر زمان تماس

تأثیر زمان تماس بر راندمان تجزیه علف کش ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$  مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در نمودار شماره ۳ آمده است. در این نمودار، به صورت واضح افزایش راندمان تجزیه با افزایش زمان تماس مشاهده می شود. با افزایش زمان تماس تا ۱۲۰ دقیقه، راندمان تجزیه با شیب نسبتاً تندی افزایش می یابد و بعد از این زمان، افزایش راندمان تجزیه با شیب آرام تری ادامه می یابد. افزایش ناچیزی در راندمان تجزیه با افزایش زمان تماس بیش تر از ۱۲۰ دقیقه مشاهده می شود. لذا زمان تماس ۱۲۰ دقیقه به عنوان زمان تماس بهینه در نظر گرفته شد.

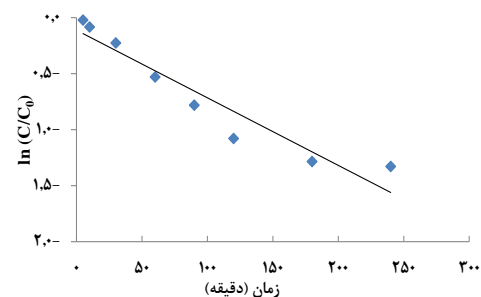


نمودار شماره ۳: تأثیر زمان تماس بر راندمان تجزیه علف کش ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$  (دوز نانوذره: ۱ گرم بر لیتر، ۳ pH و غلظت اولیه علف کش: ۱۰ میلی گرم بر لیتر)

فاکتور  $pK_a$  علف کش D-۲۴ و یونیزه شدن آن در pHهای بالاتر از ۲/۶۴ ذکر شده است (۶).

در حالی که رضایی کلاتری و همکاران، pH بهینه برای تجزیه فتوکاتالیستی سم دیازینون با استفاده از نانوذرات  $TiO_2$  را برابر با ۸ گزارش کردند (۳۴). pH بهینه برای تجزیه فتوکاتالیستی اسید ترفتالیک با استفاده از نانوذرات  $TiO_2$  و ZnO به ترتیب برابر با ۴ و ۹ گزارش شده است که دلیل این نتایج به  $pH_{pzc}$  نانوذرات (که به ترتیب برابر با ۶/۲۵ و ۹/۳) و  $pK_a$  اسید ترفتالیک (۳/۵۲) نسبت داده شده است (۳۵). در pH های زیر  $pK_a$  یک ترکیب آلی به صورت خنثی وجود دارد و بالای  $pK_a$  ترکیب آلی یک بار منفی کسب می کند. این تغییرات نیز می تواند به طور قابل توجهی بر رفتار جذب ترکیب بر روی سطح کاتالیست اثر بگذارد (۳۱).  $pK_a$  علف کش دی کلروفتوکسی استیک اسید ۲/۶۴ است. در pH های بالاتر از این مقدار، تقریباً همه علف کش به صورت یونیزه وجود دارد. در نتیجه حالالت آن از ملکولهای اولیه بالاتر است. در بالاتر از این pH، علف کش به صورت آنیون وجود دارد (۳۶).  $pH_{pzc}$  نانوذرات اکسید ایندیوم نیز حدود ۸/۷ گزارش شده است (۳۷، ۳۱). بار سطحی فتوکاتالیست در pH پایین تر نسبت به  $pH_{pzc}$  مثبت است. لذا pH باید از  $pH_{pzc}$  پایین تر و از مقدار  $pK_a$  آلاینده بالاتر باشد، زیرا تعامل الکترواستاتیکی میان آنیون های آلاینده و بار سطحی مثبت کاتالیست افزایش می یابد (۳۵). از سوی دیگر بیان شده است که در pHهای بالاتر، غلظت های بالایی از یون های هیدروکسیل برای واکنش با حفره ها و تشکیل رادیکال هیدروکسیل ( $OH^\cdot$ ) وجود دارد که در نتیجه تجزیه فتوکاتالیستی آلاینده را افزایش می دهد. اما تفسیر اثر pH بر روی فرآیند فتوکاتالیستی به دلیل نقش چندگانه آن بر روی فرآیند نظیر برهمکنش های الکترواستاتیکی بین سطح نیمه هادی، ملکول های حلال، لایه و رادیکال های باردار تشکیل شده در طول فرآیند واکنش، بسیار مشکل

که در آن  $C_0$  و  $C_t$  به ترتیب غلظت های علف کش ۲-۴-D (بر حسب میلی گرم بر لیتر) در زمان های  $t$  و صفر،  $k$  ثابت سرعت تجزیه در سینتیک شبه درجه یک ( $\text{min}^{-1}$ ) می باشد (۳۳، ۳۲). پارامترهای  $k$  و  $R^2$  محاسبه شده برای سینتیک شبه درجه یک فرآیند اکسیداسیون فتوکاتالیستی علف کش ۲، ۴-دی کلروفتوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$  به ترتیب برابر با ۰/۰۰۶ و ۰/۹۱۵ می باشد. نمودار شماره ۵ تطابق سینتیک شبه درجه یک برای فرآیند مورد مطالعه را نشان می دهد.



نمودار شماره ۵: سینتیک شبه درجه یک فرآیند اکسیداسیون فتوکاتالیستی علف کش ۲، ۴-دی کلروفتوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$  (pH=۳، و دوز کاتالیزور: ۲۰ میلی گرم بر لیتر)

جدول شماره ۲: پارامترهای محاسبه شده برای سینتیک شبه درجه یک فرآیند اکسیداسیون فتوکاتالیستی علف کش ۲، ۴-دی کلروفتوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$

شرایط بهره برداری	$k$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$R^2$
غلظت اولیه سم $10 \text{ mg/L}$ ، pH=۳، دوز فتوکاتالیست $1 \text{ g/L}$	۰/۰۰۶	۰/۹۱۵

## بحث

بررسی اثر pH بر فرآیند اکسیداسیون فتوکاتالیستی علف کش ۲، ۴-دی کلروفتوکسی استیک اسید با استفاده از  $UV/In_2O_3$  نشان داد که بالاترین راندمان حذف در pH برابر با ۳ می باشد. بررسی فرآیند جذب D-۲۴ بر روی نانوذرات اکسید آهن در محدوده pH برابر با ۳ تا ۱۱ نشان داد که بالاترین راندمان جذب در pH های اسیدی و در pH برابر با ۳ حاصل می شود. در این مطالعه دلیل افزایش جذب در pH های اسیدی به

1. The Point of Zero Charge

است (۳۱). لذا بیان توضیح و تفسیر کاملی برای اختلافات بین مقادیر pH های بهینه گزارش شده در مطالعات مختلف، به دلیل پارامترهای مختلف وابسته به هم نظیر ویژگی‌های نمونه، خصوصیات سطحی و شرایط آزمایشگاهی مشکل است (۳۸).

نتایج حاصل از بررسی اثر دوز کاتالیست بر راندمان تجزیه علف کش ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از UV/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در محدوده ۰/۱ تا ۲ گرم بر لیتر نشان داد دوز بهینه کاتالیست برابر با ۱ گرم بر لیتر می‌باشد. صلواتی و همکاران تجزیه فتوکاتالیستی متیلن بلو با استفاده از نانوذرات In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> را مورد بررسی قرار دادند. در دوز فتوکاتالیست برابر با ۲ گرم بر لیتر راندمان تجزیه برابر با ۲۲ درصد بود (۳۹). تجزیه رنگ راکتیور ۲ با استفاده از نانوذرات In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> توسط Wu و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق دوز کاتالیست برابر با ۰/۲ گرم بر لیتر بود که راندمان ۴۹ درصد به دست آمد (۳۰).

Singh و همکاران نیز گزارش کردند که تجزیه نوری سم ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با افزایش دوز نانوذره TiO<sub>2</sub> تا ۲ گرم بر لیتر افزایش می‌یابد و پس از آن و تا غلظت ۵ گرم بر لیتر تغییر قابل توجهی در راندمان فرآیند رخ نمی‌دهد (۴۰). دوزهای نانوذره بالاتر از مقدار بهینه سبب می‌شود که مقدار انرژی فوتونی که در نیمه هادی منتقل می‌گردد، به دلیل مزاحمت ذرات کاتالیست کاهش می‌یابد. از طرفی مقدار بهینه کاتالیست مورد استفاده به شدت وابسته به نوع و غلظت اولیه آلاینده، سرعت تولید رادیکال‌های آزاد و هم‌چنین شرایط عملیاتی می‌باشد. بنابراین مقدار بهینه کاتالیست با توجه به نوع و غلظت اولیه آلاینده، سرعت تولید رادیکال‌های آزاد و شرایط عملیاتی متفاوت خواهد بود (۳۵، ۴۱). تاثیر زمان تماس بر راندمان تجزیه علف کش ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از UV/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> نشان داد با افزایش زمان تماس، راندمان فرآیند افزایش می‌یابد.

در مطالعه Li و همکاران که به بررسی راندمان تجزیه رنگ متیل نارنجی با استفاده از نانو کامپوزیت In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> پرداختند، مشخص شد که نسبت غلظت نهایی رنگ به غلظت اولیه رنگ می‌تواند به کم‌تر از ۰/۲ کاهش یابد که راندمان بالای ۸۰ درصد را نشان می‌دهد (۱۹). نتایج بررسی تجزیه فتوکاتالیستی علف کش ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از نانوذرات In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> که توسط Rodríguez-González و همکاران انجام شد نیز نشان داد که این فرآیند با ضریب k برابر با ۰/۰۷۵ min<sup>-1</sup> از سینتیک شبه درجه یک پیروی می‌کند (۲۸).

در پایان می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش pH، راندمان تجزیه علف کش کاهش می‌یابد که علت این پدیده می‌تواند باردار شدن سطح نانوذره در pH های پایین‌تر از pH<sub>pzc</sub> باشد که در این شرایط، سطح نانوذره دارای بار مثبت است و تعامل الکترواستاتیکی میان آنیون‌های آلاینده و بار سطحی مثبت کاتالیست افزایش می‌یابد. افزایش زمان تماس باعث افزایش راندمان تجزیه علف کش و افزایش غلظت اولیه علف کش باعث کاهش راندمان تجزیه شد. افزایش دوز کاتالیست نیز در ابتدا سبب افزایش راندمان تجزیه شد و با افزایش بیش‌تر دوز کاتالیست، یک کاهش جزئی در راندمان تجزیه مشاهده شد. بررسی‌ها نشان داد که فرآیند اکسیداسیون فتوکاتالیستی علف کش ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از UV/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با ضریب رگرسیون برابر با ۰/۹۱۵ از سینتیک شبه درجه یک تبعیت می‌کند. تجزیه علف کش ۲, ۴- دی کلرو فنوکسی استیک اسید با استفاده از UV/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> راندمان نسبتاً مناسبی نشان داد.

با این وجود جهت کاربردی کردن این نتایج، نیاز به مطالعات بیش‌تر به منظور افزایش راندمان فرآیند از طریق کاربرد ترکیب این نانوذرات با سایر فتوکاتالیست‌ها و بررسی راندمان فرآیند بر روی یک نمونه واقعی آب یا زهاب کشاورزی حاوی این علف کش می‌باشد.



## سپاسگزاری

حیدریه وهمکاری پرسنل محترم آزمایشگاه آب و فاضلاب دانشگاه علوم پزشکی تربت حیدریه در اجرای این طرح تشکر نمایند.

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی شهید صدوقی یزد و دانشگاه علوم پزشکی تربت

## References

- Zand E, Baghestani M, Nezamabadi N, Min Bashi Moeini M, Hadizadeh M. A review on the last list of herbicides and the most important weeds of Iran. *Weed Research Journal* 2009; 1(2): 83-100.
- Tang Y, Luo S, Teng Y, Liu C, Xu X, Zhang X, et al. Efficient removal of herbicide 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid from water using Ag/reduced graphene oxide co-decorated TiO<sub>2</sub> 2 nanotube arrays. *J Hazard Mater* 2012; 241-242: 323-330.
- Kundu S, Pal A, Dikshit AK. UV induced degradation of herbicide 2, 4-D: kinetics, mechanism and effect of various conditions on the degradation. *Separation and Purification Technology*. 2005; 44(2): 121-129.
- Han D, Jia W, Liang H. Selective removal of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid from water by molecularly-imprinted amino-functionalized silica gel sorbent. *J Environ Sci (China)* 2010; 22(2): 237-241.
- Bian X, Chen J, Ji R. Degradation of 2, 4-Dichlorophenoxyacetic Acid (2,4-D) by Novel Photocatalytic Material of Tourmaline-Coated TiO<sub>2</sub> Nanoparticles: Kinetic Study and Model. *Materials* 2013; 6(4): 1530-1542.
- Tang L, Zhang S, Zeng G-M, Zhang Y, Yang G-D, Chen J, et al. Rapid adsorption of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid by iron oxide nanoparticles-doped carboxylic ordered mesoporous carbon. *J Colloid Interface Sci* 2015; 445: 1-8.
- Tang Y, Zhang G, Liu C, Luo S, Xu X, Chen L, et al. Magnetic TiO<sub>2</sub>-graphene composite as a high-performance and recyclable platform for efficient photocatalytic removal of herbicides from water. *J Hazard Mater* 2013; 252-253: 115-122.
- Yousefi Z, Mohmadpour R-A, Zarei E, BarafrashtehPour M. Lignin degradation from synthetic wastewater of pulp and paper industries by using of UV/Fe-Doped TiO<sub>2</sub> photocatalytic process. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2014; 23(2): 96-106.
- Dianati Tilaki R, Zazouli M, Yazdani J, Alamgholilu M. Efficiency and Kinetics Studies of Photocatalytic Degradation of 4-Chlorophenol from Aqueous Solutions by Sunlight in the Presence of Zinc Oxide Nanoparticles. *J Health* 2015; 6(2): 134-143.
- Zazouli MA, Ebrahimzadeh MA, Yazdani Cherati J, Shiralizadeh Dezfoli A, Rostamali E, Veisi F. Effect of Sunlight and Ultraviolet Radiation in the Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) Nanoparticles for Removal of Furfural from Water. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2013; 23(107): 126-138.
- Shibin OM, Yesodharan S, Yesodharan EP. Sunlight induced photocatalytic degradation of herbicide diquat in water in presence of ZnO. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015; 3(2): 1107-1116.
- Vranješ M, Šaponjić ZV, Živković LS, Despotović VN, Šojić DV, Abramović BF, et al.

---

Elongated titania nanostructures as efficient photocatalysts for degradation of selected herbicides. *Applied Catalysis B: Environmental* 2014; 160-161: 589-596.

13. Dávila-Jiménez MM, Elizalde-González MP, García-Díaz E, Santes-Aquino AM. Assessment of the effectiveness of combined adsorption and photocatalysis for removal of the herbicide isoproturon. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2016; 91: 77-86.
14. Solís RR, Javier Rivas F, Gimeno O, Pérez-Bote JL. Photocatalytic ozonation of pyridine-based herbicides by N-doped titania. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 2016; 91(7): 1998-2008.
15. Seck E, Doña-Rodríguez J, Fernández-Rodríguez C, González-Díaz O, Araña J, Pérez-Peña J. Photocatalytic removal of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid by using sol-gel synthesized nanocrystalline and commercial TiO<sub>2</sub>: Operational parameters optimization and toxicity studies. *Applied Catalysis B: Environmental* 2012; 125: 28-34.
16. Rivera-Utrilla J, Sánchez-Polo M, Ocampo-Pérez R. Role of activated carbon in the photocatalytic degradation of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid by the UV/TiO<sub>2</sub>/activated carbon system. *Applied Catalysis B: Environmental* 2012; 126: 100-107.
17. Seck E, Doña-Rodríguez J, Fernández-Rodríguez C, Portillo-Carrizo D, Hernández-Rodríguez M, González-Díaz O, et al. Solar photocatalytic removal of herbicides from real water by using sol-gel synthesized nanocrystalline TiO<sub>2</sub>: operational parameters optimization and toxicity studies. *Solar Energy* 2013; 87: 150-157.
18. Yang L, Sun W, Luo S, Luo Y. White fungus-like mesoporous Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> ball/TiO<sub>2</sub> heterojunction with high photocatalytic efficiency in purifying 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid/Cr(VI) contaminated water. *Applied Catalysis B: Environmental* 2014; 156-157: 25-34.
19. Li C, Ming T, Wang J, Wang J, Yu JC, Yu S-h. Ultrasonic aerosol spray-assisted preparation of TiO<sub>2</sub>/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite for visible-light-driven photocatalysis. *Journal of Catalysis* 2014; 310: 84-90.
20. Xiang X, Xie L, Li Z, Li F. Ternary MgO/ZnO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterostructured photocatalysts derived from a layered precursor and visible-light-induced photocatalytic activity. *Chemical Engineering Journal* 2013; 221: 222-229.
21. Sreethawong T, Ngamsinlapasathian S, Yoshikawa S. Photochemically deposited nano-Ag/sol-gel TiO<sub>2</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mixed oxide mesoporous-assembled nanocrystals for photocatalytic dye degradation. *J Colloid Interface Sci* 2014; 421: 191-198.
22. Vaiano V, Sacco O, Pisano D, Sannino D, Ciambelli P. From the design to the development of a continuous fixed bed photoreactor for photocatalytic degradation of organic pollutants in wastewater. *Chemical Engineering Science* 2015; 137: 152-160.
23. Yang T-H, Harn Y-W, Huang L-D, Pan M-Y, Yen W-C, Chen M-C, et al. Fully integrated Ag nanoparticles/ZnO nanorods/graphene heterostructured photocatalysts for efficient conversion of solar to chemical energy. *Journal of Catalysis* 2015; 329: 167-176.
24. Pham T-D, Lee B-K, Lee C-H. The advanced removal of benzene from aerosols by photocatalytic oxidation and adsorption of Cu-TiO<sub>2</sub>/PU under visible light irradiation. *Applied Catalysis B: Environmental* 2016; 182: 172-183.
25. Cho YS, Huh YD. Controlled-synthesis and photocatalytic properties of h-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and c-

- In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Bull Korean Chem Soc 2010; 31(6): 1769-1772.
26. Chakraborty A, Kebede M. Efficient Decomposition of Organic Pollutants Over In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> Nanocomposite Photocatalyst Under Visible Light Irradiation. J Clust Sci 2012; 23(2): 247-257.
27. Cho SY, Kim SJ, Kim TY, Moon H, Kim SJ. Adsorption characteristics of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid and 2, 4-dinitrophenol in a fixed bed adsorber. Korean J Chem Eng 2003; 20(2): 365-374.
28. Rodríguez-González V, Moreno-Rodríguez A, May M, Tzompantzi F, Gómez R. Slurry photodegradation of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid: a comparative study of impregnated and sol-gel In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> mixed oxide catalysts. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 2008; 193(2-3): 266-270.
29. Rodríguez-González V, Paraguay-Delgado F, García-Montelongo X, Torres-Martínez L, Gómez R. Effect of the In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content on the photodegradation of the alizarin dye using TiO<sub>2</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanostructured semiconductors. Journal of Ceramic Processing Research 2008; 9(6): 606-610.
30. Wu C-H, Kuo C-Y, Lai C-H, Chung W-Y. Surface characteristics and photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite powders by using the sol-gel method: effects of preparation conditions. Reac Kinet Mech Cat 2014; 112(2): 543-557.
31. Talebian N, Nilforoushan MR, Ghasem RR. Enhanced photocatalytic activities of ZnO thin films: a comparative study of hybrid semiconductor nanomaterials. J Sol-Gel Sci Technol 2012; 64(1): 36-46.
32. Gu X, Lu S, Qiu Z, Sui Q, Banks CJ, Imai T, et al. Photodegradation performance of 1,1,1-trichloroethane in aqueous solution: In the presence and absence of persulfate. Chemical Engineering Journal 2013; 215-216: 29-35.
33. Zazouli MA, Veisi F, Veisi A. Modeling Bisphenol A Removal from Aqueous Solution by Activated Carbon and Eggshell. J Mazandaran Univ Med Sci 2013; 22(2): 129-138.
34. Rezaei Kalantari R, Dadban Shahamat Y, Farzadkia M, Esrafil A. Investigation of photocatalytic degradation of Diazinon in synthetic wastewater using nano-TiO<sub>2</sub>/UV. J Guilan Univ Med Sci 2013; 22(Supplement 1): 32-41.
35. Safari H, Ahmadpour A, Mousavi M, Rashidi H. Compare of TiO<sub>2</sub>/ZnO nanoparticles in to photocatalytic removal of terephthalic acid from aqueous solution. 14th Iranian National Congress of Chemical Engineering; Sharif University of Technology, 2013. p: 1-5.
36. Bekbölet M, Yenigün O, Yücel I. Sorption studies of 2, 4-D on selected soils. Water, Air, and Soil Pollution 1999; 111(1-4): 75-88.
37. Kosmulski M. Pristine points of zero charge of gallium and indium oxides. J Colloid Interf Sci 2001; 238(1): 225-227.
38. Deshpande AS, Shchukin DG, Ustinovich E, Antonietti M, Caruso RA. Titania and mixed titania/aluminum, gallium, or indium oxide spheres: sol-gel/template synthesis and photocatalytic properties. Adv Funct Mater 2005; 15(2): 239-245.
39. Salavati H, Saedi H. Photocatalytic Oxidation of Aromatic Pollutants and Electrochemical Behavior in Water Over Nanopolyphosphotungstate Supported on In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Int J Electrochem Sci 2014; 10(22): 4208-4222.
40. Singh H, Muneer M. Photodegradation of a herbicide derivative, 2, 4-dichlorophenoxy acetic acid in aqueous suspensions of

---

titanium dioxide. Research on chemical intermediates 2004; 30(3): 317-329.

41. Samarghandi MR, Siboni M, Maleki A, Jafari SJ, Nazemi F. Kinetic Determination and Efficiency of Titanium Dioxide

Photocatalytic Process in Removal of Reactive Black 5 (RB5) Dye and Cyanide from Aquatic Solution. J Mazandaran Univ Med Sci 2011; 21(81): 44-52.