

فوتوکاتالیز؛ اصول و برخی کاربردها

نویسنده:

ابراهیم زارعی کیاسری: استادیار گروه علوم پایه؛
پردیس دکتر شریعتی؛ دانشگاه فرهنگیان

چکیده

در این کار، درباره‌ی اصول فرایند فوتوکاتالیز مطالبی ارائه گردیده است. در این راستا، به نظریه‌ی نوار که بیان کننده علت اصلی اختلاف میان مواد رسانا، نیمه رسانا و نارساناست، اشاره شده است. در ادامه، پدیده‌هایی که در اثر تحریک نوری یک نیمه رسانا رخ می‌دهند، مورد بحث قرار گرفته‌اند. همچنین ساختار برخی دگرشکل‌های TiO_2 به عنوان یک نیمه رسانای مناسب برای انجام فوتوکاتالیز، مورد بررسی قرار داده شده است. در پایان، به طور مختصر برخی کاربردهای فرایند فوتوکاتالیز به ویژه در حذف آلاینده‌ها از پساب‌ها بیان شده است.

کلید واژه‌ها: فوتوکاتالیز، نظریه‌ی نوار، نیمه رسانا، TiO_2 ، حذف آلاینده‌ها

مقدمه

همانطور که در کتب شیمی دوره‌ی متوسطه بیان گردیده است کاتالیز فرایندی که در آن یک ماده یعنی کاتالیزور سرعت انجام یک واکنش شیمیایی را تسریع می‌نماید. فوتوکاتالیز در واقع حالت خاصی از فراین کاتالیز است که به کمک نور انجام می‌شود. در سال ۱۹۷۲، فوجیشیما^۱ و هوندا^۲ تجزیه فوتوکاتالیزی آب را روی سطح الکترودهای TiO_2 کشف کردند (فوجیشیما، ۱۹۷۲). این پدیده شروع عصر جدیدی را در فوتوکاتالیز ناهمگن رقم زد. از آن پس، تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌ای توسط شیمیدان‌ها، فیزیکدان‌ها و مهندسی‌ن شیمی برای فهم فرایندهای بنیادی و

افزایش بازدهی فوتوکاتالیزی در سطح TiO_2 انجام گرفت. چنین مطالعاتی اغلب با تجدید انرژی و ذخیره آن در ارتباط بودند (گراتزل، ۱۹۸۳). بسیاری از گزارشات تحقیقاتی نشان داده‌اند که ذرات نیمه هادی دارای شکاف نوار انرژی بزرگ^۳ نظیر ZnO ، TiO_2 و WO_3 به عنوان یک فوتوکاتالیزور عالی، می‌توانند بسیاری از آلاینده‌های آلی موجود در پساب کارخانه‌ها نظیر شوینده‌ها، رنگدانه‌ها و غیره را تحت تابش نور فرابنفش تخریب نمایند. از میان فوتوکاتالیزورهای نیمه هادی مختلف، TiO_2 به دلیل در دسترس بودن آسان، طبیعت غیر سمی، عدم خوردگی فوتوشیمیایی و فعالیت کاتالیزوری مؤثر مورد توجه قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، تصفیه محیط زیست از آلاینده‌ها، یکی از مهمترین فعالیت‌ها در حوزه فوتوکاتالیز ناهمگن می‌باشد. این کار از کاربرد ذاتی فوتوکاتالیز بر اساس TiO_2 ، الهام گرفته شده است (اولیس، ۱۹۹۳). در این مقاله با زبانی ساده و روان، برای درک بهتر فرایند فوتوکاتالیز، مطالبی راجع به نظریه نوار در نیمه‌هادی‌ها، ساختمان TiO_2 و مثال‌هایی از فوتوکاتالیز برخی مواد در سطح این نیمه‌هادی ذکر گردیده است.

بحث

۱- نظریه نوار

بر اساس نظریه اربیتال مولکولی، در یک مولکول از ترکیب معادلات موجی اربیتال‌های اتمی هم انرژی اتم‌های تشکیل دهنده آن مولکول، اربیتال‌های مولکولی جدید شکل می‌گیرند و الکترون‌های مولکول در این اربیتال‌های جدید آرایش می‌یابند. نظریه نوار که اولین بار توسط باخ^۴ مطرح گردید، از این هم پا را فراتر می‌گذارد و بیان می‌کند که اربیتال‌های مولکولی هم انرژی در یک مولکول تشکیل نوارهای انرژی را می‌دهند (مانی، ۱۹۶۵). بر این اساس، بالاترین نوار انرژی که دارای الکترون می‌باشد، نوار ظرفیت^۵ و پایین‌ترین نوار انرژی که خالی از الکترون است، نوار هدایت^۶ نامیده می‌شود. به فاصله انرژی بین نوار ظرفیت

^۳ Large band gap

^۴ Bach

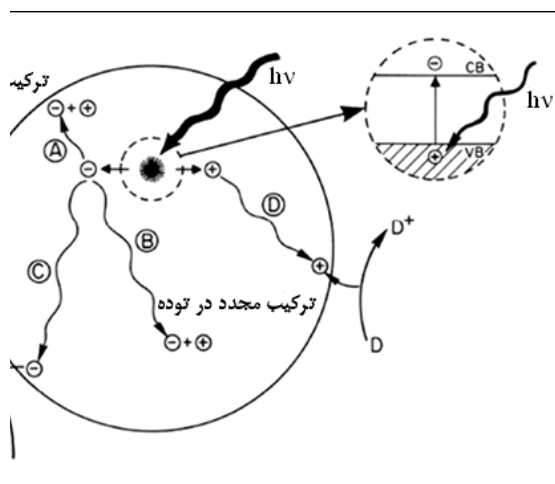
^۵ Valence band (VB)

^۶ Conduction band (CB)

^۱ Fujishima

^۲ Honda

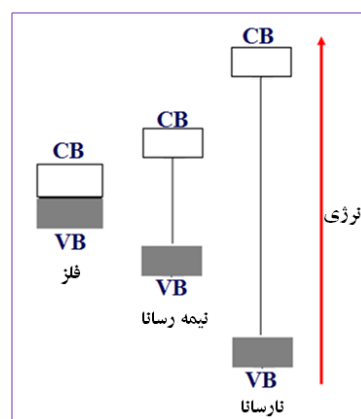
می‌شود. فرایند اولیه برای فوتوکاتالیز ترکیبات آلی و معدنی به وسیله نیمه‌هادی‌ها، تولید زوج‌های الکترون-حفره در ذرات نیمه‌هادی می‌باشد. قسمت بزرگنمایی شده شکل ۲ تحریک یک الکترون از نوار ظرفیت به نوار هدایت به کمک جذب نور با انرژی برابر یا بزرگتر از شکاف نوار نیمه‌هادی را نشان می‌دهد. بعد از تحریک، سرنوشت حفره و الکترون جدا شده در چندین مسیر رقم می‌خورد. شکل ۲ بعضی از مسیرهای آسایش برای الکترون‌ها و حفره‌ها را نشان می‌دهد (نوساکا، ۱۸۹۳).



شکل ۲- طرح نموداری فوتوکاتالیز در یک جامد به همراه پدیده‌های ترکیب مجدد.

انتقال الکترون و حفره‌ها به گونه‌های آلی و معدنی یا مولکول‌های حلال جذب شده، از انتقال الکترون‌ها و حفره‌ها به سطح نیمه‌هادی نتیجه می‌شود. اگر گونه‌ها روی سطح نیمه‌هادی پیش جذب شوند، فرایند انتقال الکترون مؤثرتر است (ماتیوز، ۱۹۸۸). الکترون‌های رسیده به سطح باعث کاهش یک پذیرنده الکترون (معمولاً اکسیژن در یک محلول هوادهی شده) می‌شوند (مسیر C)، در صورتی که حفره‌های مهاجرت نموده به سطح، باعث اکسایش یک دهنده الکترون می‌شوند (مسیر D). امکان انجام و سرعت فرایندهای انتقال بار برای الکترون‌ها و حفره‌ها به موقعیت نسبی لبه‌های نوار برای نوارهای هدایت و ظرفیت و ترازهای پتانسیل ردوکس گونه‌های جذب شده بستگی دارد. نکته مهم آنکه قدرت کاهندگی و اکسندگی نیمه‌هادی با انجام فرایند تحریک افزایش می‌یابد.

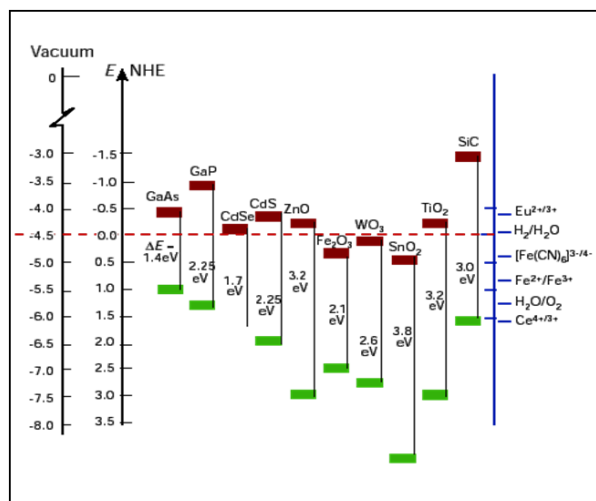
و نوار هدایت در یک ماده، شکاف نوار انرژی اطلاق می‌گردد (شکل ۱). همانطور که در این شکل دیده می‌شود، در فلزات این دو نوار با هم همپوشانی دارند، بنابراین فلزات حتی در شرایط عادی نیز دارای هدایت الکتریکی می‌باشند. اما فاصله زیاد انرژی بین دو نوار ظرفیت و هدایت در مواد عایق، باعث نارسا شدن این مواد از نقطه نظر الکتریکی می‌گردد. در مورد مواد نیمه‌هادی شکاف نوار انرژی به اندازه‌ای است که این مواد در شرایط معمولی هادی نمی‌باشند، در صورتی که این مواد با اعمال مقداری انرژی به روش‌های مختلف مانند تابش نور، دادن حرارت و ایجاد شوک‌های الکتریکی رسانای جریان الکتریسیته می‌شوند (مانی، ۱۹۶۵).



شکل ۱- طرح نموداری ایجاد نوارها در جامدات از اربیتال‌های اتمی اتم‌های منفرد.

۲- تحریک نوری شکاف نوار انرژی نیمه‌هادی

بر خلاف فلزات که نوارهای الکترونی پیوسته دارند، نیمه‌هادی‌ها دارای یک ناحیه انرژی خالی از الکترون (شکاف نوار) می‌باشند که در آنجا هیچ تراز انرژی برای ترکیب مجدد یک الکترون و حفره تولید شده در اثر تحریک نوری، در دسترس نمی‌باشد. هنگامی که تحریک در شکاف نوار رخ می‌دهد، این تحریک دارای طول عمر کافی (در حد نانو ثانیه) می‌باشد به طوری که فرصت انتقال بار به گونه‌های جذب شده (گونه‌های موجود در فاز محلول یا گازی) در سطح نیمه‌هادی وجود دارد. اگر نیمه‌هادی دست نخورده باقی بماند و انتقال بار به گونه‌های جذب شده پیوسته و گرماده باشد فرایند فوتوکاتالیز ناهمگن نامیده



شکل ۳- سطوح انرژی نوار ظرفیت و نوار هدایت چند نیمه‌هادی در محلول آبی با $\text{pH} = 1$.

۴- فوتوکاتالیز در سطح TiO_2

از بین نیمه‌هادی‌های گوناگون، TiO_2 به عنوان یک فوتوکاتالیزور به طور وسیعی در فوتوکاتالیز ترکیبات معدنی و آلی به ویژه آلایندگی موجود در هوا و پساب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (اولیس، ۱۹۹۳). علت این چنین علاقمندی برای استفاده از TiO_2 به برخی مزیت‌های آن مانند قیمت پایین، سمیت کم، پایداری شیمیایی بالا و مقاومت در برابر خوردگی توسط نور مربوط است که از شکاف نوار زیاد آن ناشی می‌شود (لینسبیگلر، ۱۹۹۵).
 دو ساختار بلوری متفاوت TiO_2 ، روتیل و آناتاز، به طور مرسوم در فوتوکاتالیز و فوتوالکتروکاتالیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل ۴-الف، ساختار سلول‌های واحد بلورهای روتیل و آناتاز و اختلاف‌های ساختاری آنها را نشان می‌دهد. مشخص شده است که آناتاز فعالیت فوتوکاتالیزی بالاتری دارد. این اختلاف به تفاوت در ساختارهای بلوری این دو فاز مربوط است. ساختارهای روتیل و آناتاز بر حسب زنجیرهای هشت‌وجهی TiO_6 (هر یون Ti^{4+} توسط شش یون O^{2-} به صورت هشت‌وجهی احاطه شده است) توصیف می‌شود. دو ساختار بلوری توسط میزان انحراف هر اکتاهدرال و همچنین در اثر تفاوت در الگوی تجمعی زنجیرهای هشت‌وجهی تفاوت دارند. نکته قابل توجه دیگر از دقت در تغییرات انرژی آزاد گیبس استاندارد دو فاز آناتاز و روتیل به دست می‌آید و

ترکیب مجدد الکترون و حفره با انتقال بار به گونه‌های جذب شده، رقابت می‌نماید. این فرایند می‌تواند در توده (مسیر B) یا در سطح (مسیر A) نیمه‌هادی با آزاد نمودن گرما انجام گیرد. بازدهی فرایند فوتوکاتالیز (بازدهی کوانتومی) به صورت تعداد پدیده‌های فوتوکاتالیز رخ داده بر تعداد فوتون‌های جذب شده تعریف می‌شود (ماتیوز، ۱۹۸۸). واضح است که ترکیب مجدد الکترون و حفره باعث کاهش بازدهی فرایند فوتوکاتالیز می‌شود. برای حذف ترکیب مجدد، به عنوان مثال از تله‌های حاملین بار استفاده می‌شود که منجر به فرایند انتقال بار مؤثرتر می‌شوند. بنابراین اصلاحاتی در نیمه‌هادی نظیر افزایش فلزات و ترکیب با نیمه‌هادی‌های دیگر به عنوان تله‌های حاملین بار، در کاهش ترکیب مجدد و افزایش بازدهی فوتوکاتالیز مفید است.

۳- موقعیت‌های لبه نوار

توانایی یک نیمه‌هادی برای انتقال بار (الکترون و حفره) به گونه‌های پذیرنده و دهنده الکترون به موقعیت لبه نوار نوارهای هدایت و ظرفیت یک نیمه‌هادی و پتانسیل ردوکس گونه‌های پذیرنده و دهنده الکترون بستگی دارد. تراز پتانسیل گونه‌های پذیرنده برای انجام فرایند انتقال الکترون، باید به طور ترمودینامیکی پایین‌تر (مثبت‌تر) از پتانسیل نوار هدایت نیمه‌هادی باشد. همچنین تراز پتانسیل دهنده برای انجام فرایند انتقال حفره باید بالاتر (منفی‌تر) از موقعیت نوار ظرفیت نیمه‌هادی باشد، موقعیت‌های لبه‌های نوار هدایت و ظرفیت چندین نیمه‌هادی در شکل ۳ ارائه شده است (لینسبیگلر، ۱۹۹۵). مقیاس انرژی در سمت چپ برای مقایسه با تراز خلأ و با الکتروکاتالیزور نرمال^۱ قرار دارد. موقعیت‌ها در یک محلول دارای $\text{pH} = 1$ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. pH محلول الکترولیت روی موقعیت لبه نوار نیمه‌هادی‌ها تأثیر دارد.

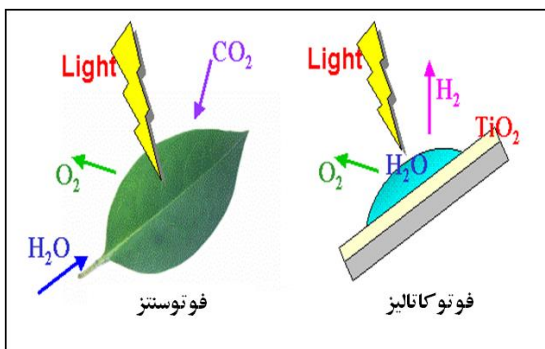
^۱Normal hydrogen electrode (NHE)

۱-۴- فوتوکاتالیز مولکول‌های معدنی کوچک روی

سطح TiO_2

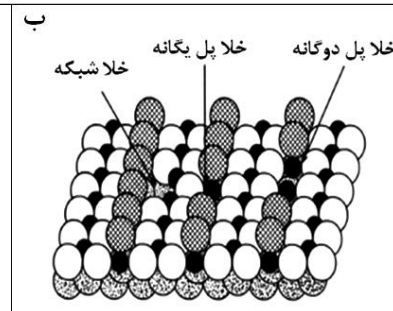
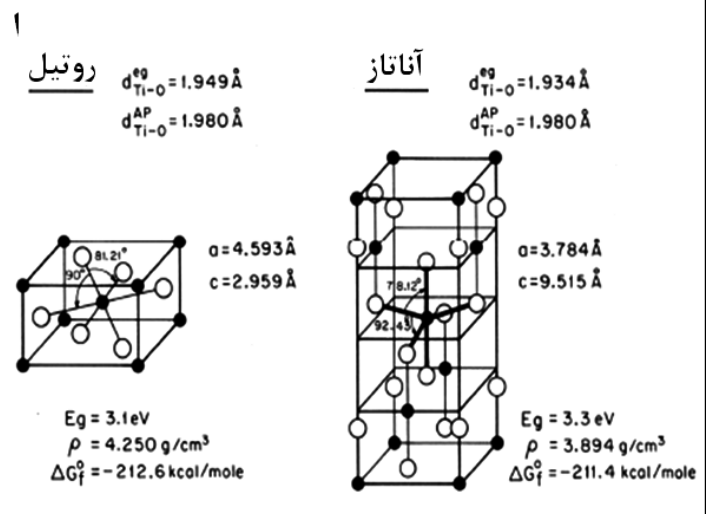
۱-۴-۱- فوتوکاتالیز آب

آب می‌تواند در سطح TiO_2 اکسیده یا کاهش داده شود و به ترتیب گازهای اکسیژن و هیدروژن تولید نماید. با توجه به این که در فرایندهای فوتوسنتز توسط کلروفیل و فوتوکاتالیز توسط فوتوکاتالیزور جذب نور صورت می‌گیرد، می‌توان شباهتی بین این دو فرایند در نظر گرفت (شکل ۵). اگرچه TiO_2 می‌تواند به طور مؤثر تحت تابش با انرژی معادل یا بزرگتر از شکاف نوار برانگیخته شود، H_2O روی سطوح تمیز TiO_2 نمی‌تواند فوتولیز گردد. شکل ۶-الف، موقعیت‌های لبه نوار TiO_2 را نسبت به پتانسیل‌های الکتروشیمیایی زوج ردوکس H_2/H_2O و زوج ردوکس O_2/H_2O نشان می‌دهد. مطابق نمودار انرژی الکترون، فوتولیز آب از نظر انرژی مساعد است. با این وجود، به دلیل وجود اضافه ولتاژ بالا برای آزاد شدن H_2 و O_2 روی سطح TiO_2 ، TiO_2 به تنهایی غیر فعال می‌شود (ساتو، ۱۹۸۰). پودر TiO_2 با ذرات فلزی رسوب داده شده بر سطح آن (مانند پلاتین به عنوان اصلاحگر و تله الکترون)، برای آزاد شدن H_2 همراه با ذرات اکسید فلزی رسوب داده شده بر سطح آن (مانند RuO_2 به عنوان اصلاحگر و تله حفره) برای آزاد شدن O_2 مطابق شکل ۶-ب، برای فوتولیز آب بکار می‌روند (ساتو، ۱۹۸۰). این سیستم نشان‌دهنده یک مدار بسته به صورت سل الکتروشیمیایی میکرو که در آن یک کاتد Pt و یک آنود RuO_2 به عنوان یک آند است، را نشان می‌دهد. حضور Pt و RuO_2 ، اضافه ولتاژ را به ترتیب برای تولید H_2 و O_2 کاهش می‌دهد.

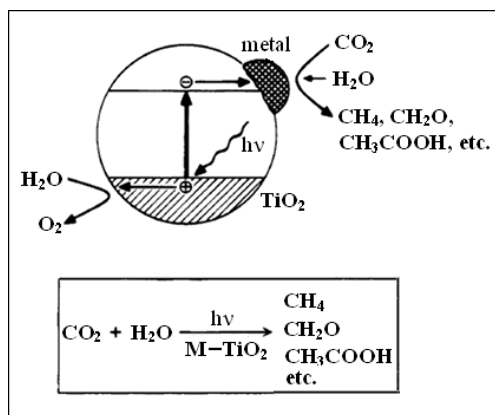


شکل ۵- شباهت میان فرایندهای فوتوسنتز و فوتوکاتالیز.

آن نکته این است که روتیل فاز پایدارتری از نظر ترمودینامیکی از آناتاز است، بنابراین افزایش دما باعث تبدیل فاز آناتاز به روتیل می‌شود. به طریق آزمایشی ثابت شده که تبدیل فاز آناتاز به روتیل در 873 K شروع و در 1073 K به پایان می‌رسد (لینسیگلر، ۱۹۹۵). همچنین شکل ۴-ب، ساختار هندسی سطح یک تک بلور (در اینجا روتیل) را نشان می‌دهد. وجود سه نوع مکان خالی برای اتم‌های اکسیژن در سطح مشاهده می‌شود. این نواقص مراکز بسیار مناسبی برای جذب مولکول‌هایی نظیر O_2 و دیگر ترکیبات شیمیایی و انجام واکنش‌های شیمیایی می‌باشند (لینسیگلر، ۱۹۹۵).



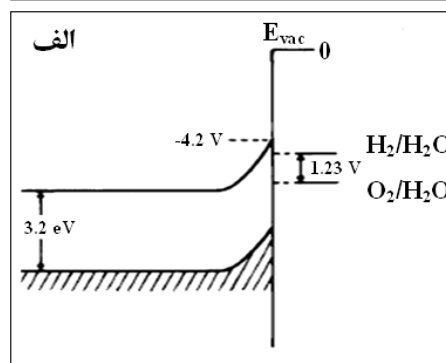
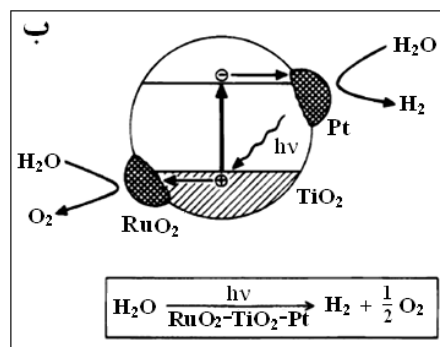
شکل ۴-الف- ساختار سلول‌های واحد TiO_2 روتیل و آناتاز. ب- انواع مکان‌های نقص در سطح TiO_2 .



شکل ۷- اثر فلز به عنوان پذیرنده الکترون روی فوتوکاهش CO_2 .

۲-۱-۴- فوتواکسایش ترکیبات آلی روی سطح TiO_2

در سال‌های اخیر، یکی از فعال‌ترین حوزه‌های تحقیق در فوتوکاتالیز، به حذف آلاینده‌های آلی محیط زیست از پساب‌های خانگی و به ویژه صنعتی مانند رنگدانه‌های آلی مانند رودامین B (بارکا، ۲۰۰۸) و لیگنین (یوسفی، ۲۰۱۴) و برخی ترکیبات سمی غیررنگدانه‌ای نظیر فنول (الیوریا، ۲۰۱۰)، ۴-کلرو فنول (لوکاک، ۲۰۰۷) و ۲-پروپانول (اوهنو، ۲۰۰۶) مربوط می‌شود. TiO_2 در چنین مطالعاتی به عنوان فوتوکاتالیزور سیستم سوسپانسیون آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تلاش‌های تحقیقاتی در بررسی فوتواکسایش این گونه ترکیبات دو هدف کلی: (۱) شناسایی حد واسط‌های واکنش، مکانیسم و سینتیک واکنش و (۲) بهینه نمودن شرایط واکنش به منظور افزایش سرعت و بازدهی فوتواکسایش را تعقیب می‌کنند (کندال، ۲۰۰۰). فوتوکاتالیز اکسایش ترکیبات آلی در فاز گازی و در فاز آبی در حد فاصل دو فاز جامد-گاز و مایع-گاز انجام می‌شود. در فوتوکاتالیز، ذرات TiO_2 بیشتر به صورت بلورهای آناتاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در اثر تابش UV ($\lambda < 380 \text{ nm}$) همانطور که قبلاً ذکر شد، یک الکترون از نوار ظرفیت به نوار هدایت (eCB^-) منتقل می‌شود که انجام این عمل مطابق معادله (۱) باعث ایجاد یک حفره با خلأ دارای بار مثبت در نوار ظرفیت ($\text{h}^+ \text{VB}$) می‌شود. ترکیبات آلی می‌توانند بطور مستقیم توسط حفره یا اینکه بوسیله رادیکال هیدروکسیل تشکیل شده در



شکل ۶- الف نمودار انرژی پتانسیل برای زوج‌های ردوکس $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ و $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ نسبت به موقعیت‌های لبه نوار نیمه هادی TiO_2 . ب- فوتولیز آب روی کاتالیزور چند سازه‌ای.

همچنین فوتوکاهش CO_2 یک فرایند مهم است، چرا که یک فرایند بیولوژیکی به حساب می‌آید که به طور طبیعی رخ می‌دهد. از کاهش CO_2 فرمیک اسید، فرمالدئید، متانول و مقدار بسیار کمی متان تولید می‌شود (اینو، ۱۹۷۹). ایشیتانی^۱ و همکاران با بررسی اثر فلزات مختلف بر گزینش‌پذیری محصولات فوتوکاهش CO_2 نشان دادند که با تغییر نوع فلز رسوب داده شده بر سطح TiO_2 ، محصول اصلی کاهش CO_2 تغییر خواهد نمود. به عنوان مثال اگر از سیستم Pd-TiO_2 استفاده گردد، محصولات اصلی متان و استیک اسید بدست خواهند آمد (شکل ۷) (ایشیتانی، ۱۹۹۳).

^۱Ishitani

Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*, 238 (5358), 37-38. (۱)

Gratzel, M. (1983). Ed. *Energy Resources Through Photochemistry and Catalysis*. New York, Academic Press.

Huitle, C. A. M., & Brillas, E. (2009). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: a general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 87 (3), 105-145.

Inoue, T., Fujishima, A., Konishi, S., & Honda, K. (1979). Photoelectrocatalytic reduction of carbon dioxide in aqueous suspensions of semiconductor powders. *Nature*, 277 (22), 637-638.

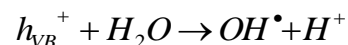
Ishitani O., Inoue, C., Suzuki, Y., & Ibusuki, T. (1993). Photocatalytic reduction of carbon dioxide to methane and acetic acid by an aqueous suspension of metal-deposited TiO₂. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 72 (3), 269-271.

Linsebigler A. L., Lu, G., & Yates, J. T. (1995). Photocatalysis on TiO₂ surfaces: principles, mechanisms, and selected results. *Chemical Reviews*, 95 (3), 735-758.

Lukac, J., Klementova, M., Bezdicka, P., Bakardjieva, S., Subrt, J., Szatmary, L., & Jikovský, J. (2007). Influence of Zr as TiO₂ doping ion on photocatalytic degradation of

اثر واکنش حفره و آب جذب شده مطابق معادله (۲) اکسید گردند (هوتل، ۲۰۰۹):

(۲)



نتیجه گیری

فوتوکاتالیز به عنوان یکی از روش‌های اکسایش پیشرفته، یکی از فرایندهایی است که در آن یک فوتوکاتالیزور که در اکثر مواقع یک نیمه‌هادی است می‌تواند با کمک نور واکنش اکسایش و یا کاهش یک ماده را تسریع نماید. این فرایند بر اساس انتقال الکترون از نوار ظرفیت به نوار هدایت نیمه‌هادی و تشکیل الکترون-حفره استوار می‌باشد. امروزه، این فرایند کاربرد زیادی را در حذف آلاینده‌ها از محیط زیست به ویژه تصفیه پساب‌ها پیدا نموده است و کاربرد آن در این مورد نیز رو به افزایش است.

منابع

Barka, N., Qourzal, S., Assabbane, A., Nounah, A., & Ait-Ichou Y. (2008). Factors influencing the photocatalytic degradation of rhodamine B by TiO₂-coated non-woven paper. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 195 (2-3), 346-351.

Candal, R. J., Zeltner, W. A., & Anderson, M. A. (2000). Effects of pH and applied potential on photocurrent and oxidation rate of saline solutions of formic acid in a photoelectrocatalytic reactor. *Environmental Science & Technology*, 34 (16), 3443-3451.

Sato, S., & White, J. M. (1980). Photoassisted water-gas shift reaction over platinized titanium dioxide catalysts. *Journal of American Chemical Society*, 102 (24), 7206-7210.

Yousefi Z., Mohmadpour, R. A., Zarei, E., & Barafraشتهpour, M. (2014). Lignin degradation from synthetic wastewater of pulp and paper industries by using of UV/Fe-Doped TiO₂ photocatalytic process. *Journal of Mazandaran University Medical Sciences*, 23 (2), 96-106 (Persian).

Abstract

It has been proven that the presence of catalysts enhances the rate of reactions. Also, the role of TiO₂ as a photocatalyst in oxidation and photodecomposition has been studied. On the other hand, the discharge of the colored compounds in the environment causes considerable non-aesthetic pollution and serious health-risk factors. Since conventional wastewater treatment plants cannot degrade the majority of these pollutants, powerful methods for the decontamination of dyes wastewaters have received increasing attention over the past decade. In this work, the contents have been presented about the principles of photocatalysis process. In this regard, band theory has been mentioned that it is indicative of the main cause of the difference between conductive, semiconductor and insulator materials. In the following, the phenomena occurring due to the optical excitation effect of a semiconductor have been discussed. Also, the structure of some allotropes of TiO₂ has

4-chlorophenol. *Applied Catalysis B: Environmental* 74 (1-2), 83-91.

Many, A., Goldstein, Y., Grover, N. B. (1965). *Semiconductor Surfaces*, North Holland, Amsterdam.

Matthews, R. W. (1988). An adsorption water purifier with in situ photocatalytic regeneration. *Journal of Catalysis*, 113 (2), 549-555.

Nosaka, Y. & Fox, M. A. (1988). Kinetics for electron transfer from laser-pulse-irradiated colloidal semiconductors to adsorbed methylviologen. Dependence of the quantum yield on incident pulse width. *Journal of Physical Chemistry*, 92 (7), 1893-1897.

Ohno, T., Miyamoto, Z., Nishijima, K., Kanemitsu, H., & Xueyuan, F. (2006). Sensitization of photocatalyst activity of S- or N-doped TiO₂ particles by adsorbing Fe³⁺ cations. *Applied Catalysis A: General*, 302 (1), 62-68.

Oliveria, H. G., Nery, D. C., & Longo, C. (2010). Effect of applied potential on photocatalytic phenol degradation using nanocrystalline TiO₂ electrodes. *Applied Catalysis B: Environmental*, 93 (3-4), 205-211.

Ollis, D. F., & Ekabi, H. A. (1993). *Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air*, Amsterdam.

been investigated. In the end, briefly, some applications of photocatalysis process, particularly in the removals of pollutants from wastewater have been expressed.

Keywords: Photocatalysis, Band theory, Semiconductor, TiO₂, Removal of pollutants