

## Enhancing Photocatalytic Activity by Piezoelectric Effect in Dye Removal from Wastewater

Bentolhoda Hadavi Moghadam, Mahdi Hasanzadeh\*

Department of Textile Engineering, Yazd University, P. O. Box: 89195-741, Yazd, Iran.

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06-04-2022

Accepted: 16-05-2022

Available online: 16-10-2022

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1401.12.2.2.9

### Keywords:

Dye wastewater

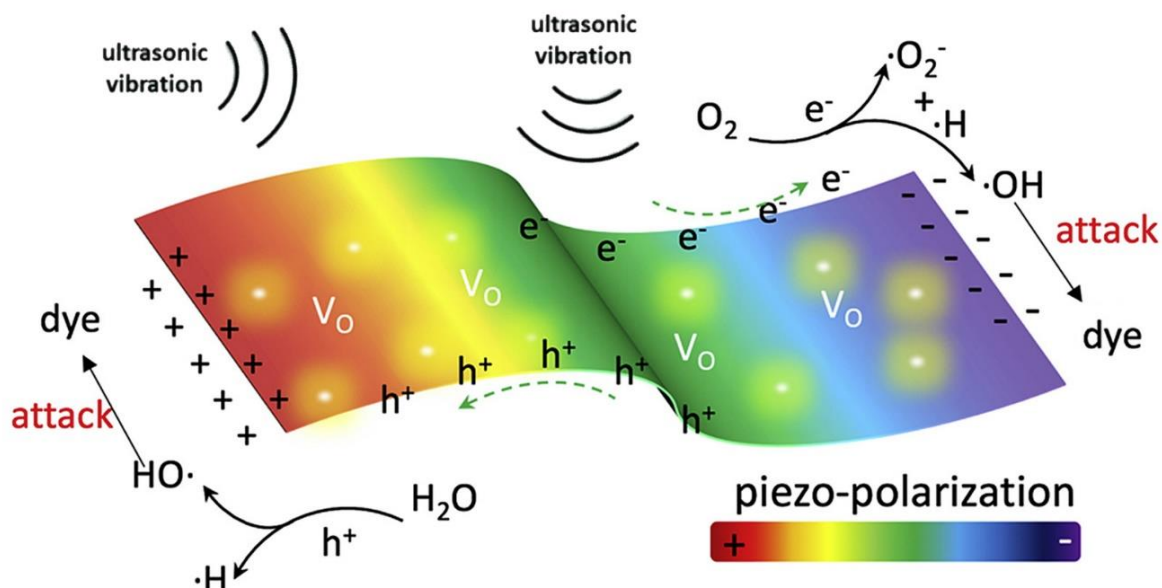
Photocatalyst

Piezocatalyst

Piezo-photocatalyst

### ABSTRACT

Nowadays, the photocatalytic process, one of the advanced oxidation methods for removing environmental pollutants, has attracted tremendous research interest. The piezo-photocatalytic effect has been proposed as one of the most effective methods to improve photocatalytic activity to increase the efficiency and effectiveness of advanced oxidation methods. Many recent efforts have been made in dye wastewater treatment using photocatalytic compounds. However, few studies have suggested using piezocatalytic properties to improve the photocatalytic performance of materials (piezo-photocatalysts). This study reviews compounds' photocatalytic, piezocatalytic, and piezo-photocatalytic properties with these properties and their potential in removing dyes from wastewater. Also, considering the literature, the approaches to increase the performance of photocatalysts and advanced applications of piezocatalysts and piezo-photocatalysts have been presented. Finally, piezo-photocatalyst has been introduced as the best approach to remove dyes from wastewater. Piezo-photocatalytic dye decomposition shows the piezoelectric efficiency in developing the piezocatalytic process. This process can promote the separation of photo-induced electron-hole pairs and lead to the synergistic effect between photocatalytic and piezocatalytic properties.



\*Corresponding author: [m.hasanzadeh@yazd.ac.ir](mailto:m.hasanzadeh@yazd.ac.ir)



## بهبود فعالیت کاتالیزور نوری به واسطه اثر پیزوالکتریک در حذف ماده رنگزا از پساب

بنت الهدی هادوی مقدم<sup>۱</sup>، مهدی حسنزاده<sup>۲\*</sup>

۱- پژوهشگر پسادکتری، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵.

### چکیده

امروزه فرآیند کاتالیزوری نوری به عنوان یکی از روش های اکسیدشدن پیشرفته در حذف آلاینده های زیست محیطی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. به منظور افزایش بازده و کارایی این فرآیند، اثر پیزوکاتالیزور نوری به عنوان یکی از موثرترین روش های بهبود فعالیت کاتالیزوری نوری پیشنهاد گردیده است. در سال های اخیر تلاش های زیادی در زمینه تصفیه پساب های رنگی با استفاده از ترکیبات با فعالیت کاتالیزوری نوری انجام شده است. با این حال مطالعات اندکی به استفاده از خاصیت پیزوکاتالیزور نوری جهت بهبود عملکرد کاتالیزور نوری مواد (پیزوکاتالیزور نوری) اشاره کرده است. در این مطالعه، مروری جامع بر ویژگی های کاتالیزوری نوری، پیزوکاتالیزور و پیزوکاتالیزوری نوری و پتانسیل ترکیبات با این ویژگی در حذف ماده رنگزا از پساب انجام شده است. همچنین با بررسی مقالات مختلف، راهکارهایی برای افزایش عملکرد کاتالیزور نوری و کاربردهای پیشرفته پیزوکاتالیزور و پیزوکاتالیزور نوری ارائه شده است. در نهایت نیز پیزوکاتالیزور نوری به عنوان بهترین گزینه جهت حذف ماده رنگزا از پساب معرفی شده است. تجزیه پیزوکاتالیزور نوری ماده رنگزا، کارایی پیزوالکتریک را در شکل گیری فرآیند پیزوکاتالیزور نشان می دهد. این فرآیند می تواند به جداسازی جفت الکترون-حفره های ایجاد شده در اثر نور کمک کند و منجر به هم افزایی بین خواص کاتالیزور نوری و پیزوکاتالیزور شود.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۶

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۲۲۳-۲۳۸۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1401.12.2.2.9

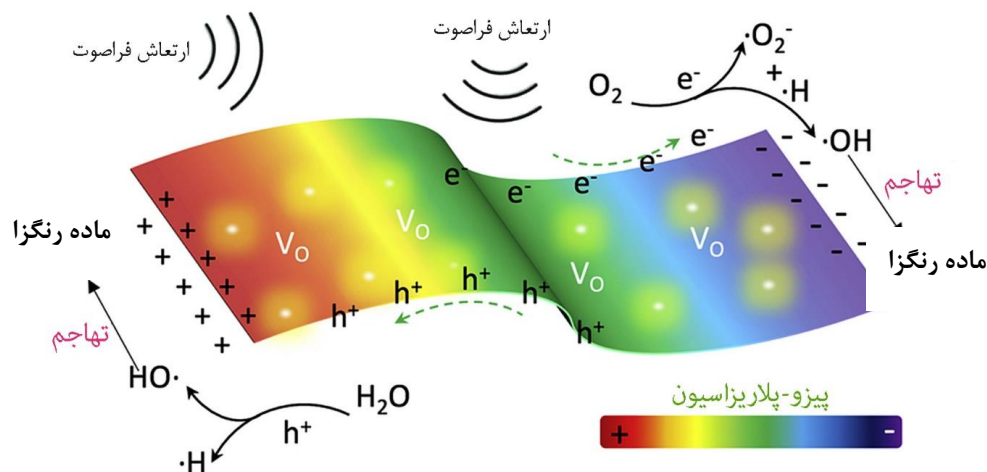
### واژه های کلیدی:

پساب رنگی

کاتالیزور نوری

پیزوکاتالیزور

پیزوکاتالیزور نوری



\*Corresponding author: [m.hasanzadeh@yazd.ac.ir](mailto:m.hasanzadeh@yazd.ac.ir)



## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل کاهش منابع آب شیرین، تصفیه پساب توجه زیادی را به خود جلب کرده است. صنایع رنگرزی از جمله صنایع پرمصرف آب به شمار می‌رود که وجود مواد رنگزای فراوان و همچنین غیرقابل تجزیه بودن آن‌ها از جمله مشکلات عمده فاضلاب تولیدی آن‌ها است. وجود یون‌های فلزی، مواد رنگزا و مواد شیمیایی در پساب‌های صنعتی باعث مزاحمت فعالیت‌های زیستی در آب‌ها شده است. مواد رنگزا ترکیباتی با ساختار پیچیده و وزن مولکولی بالا، در بیشتر مواقع سمی و مقاوم به تجزیه زیستی هستند که از طریق فاضلاب‌های صنعتی وارد محیط‌زیست می‌شوند. از بین روش‌های متنوعی که برای حذف مواد رنگزا استفاده می‌شود، می‌توان به روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی اشاره کرد. با این حال، تعداد کمی از این روش‌ها مورد استقبال صنایع قرار گرفته است. در میان روش‌های متعدد حذف مواد رنگزا، روش‌های مبتنی بر جذب، بسیار موثر و کارآمد بوده و نتایج مناسبی را برای حذف انواع مواد رنگزا ارائه کرده است [۱-۳]. براساس مطالعات انجام شده در این زمینه، فرآیندهای اکسیدشدن پیشرفته، به ویژه از طریق فوتوکاتالیزورهای نوری ناهمگن به منظور تخریب اکسیدشدنی آلاینده‌ها پیشنهاد شده است. مواد با خاصیت کاتالیزوری نوری با تابش نور فعال شده و آلاینده‌های موجود در هوا یا آب را به مواد کم‌ضرر تبدیل می‌کنند [۴-۹].

طی سال‌های اخیر، مواد پیزوالکتریک مسیر جدیدی را در توسعه کاتالیزورها گشوده است. نانومواد پیزوالکتریک به منظور تخریب آلاینده‌های آلی در آب، تحت عملیات مکانیکی و ارتعاشی قرار می‌گیرند. فرآیند پیزوکاتالیزوری یک فرآیند فیزیکی-شیمیایی است که از خاصیت پیزوالکتریک برای تسریع واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌کند. همچنین از انرژی مکانیکی نیز برای کاربردهای مختلف کاتالیزوری از جمله تصفیه آلاینده‌های آلی می‌توان استفاده کرد. بارهای الکتریکی ناشی از پیزوالکتریک از طریق اثر الکتروکاتالیزوری، واکنش‌های تخریب شیمیایی را در پساب رنگی ایجاد می‌کنند. علیرغم بازده بالا که توسط پودرهای پیزوکاتالیزوری به دست آمده است، به دلیل آنکه ذرات مورد استفاده در سیستم‌های آبی تمایل به انتشار دارند و جداسازی آنها دشوار است، سبب ایجاد آلودگی ثانویه می‌شوند [۱۰-۱۲].

در حال حاضر تبدیل مستقیم انرژی خورشید به انرژی شیمیایی به واسطه کاتالیزور نوری و کاتالیزورهای الکتریکی نوری نکته قابل توجهی برای توسعه انرژی و اصلاح محیط زیست است. با این حال، کارایی فعلی آن هنوز چندان رضایت بخش نیست و از مشکلات ویژه آن بار شدید نوترکیب است. برای حل این مشکل، اثر پیزوکاتالیزور به عنوان یکی از موثرترین تدابیر برای کاتالیزور نوری ظهور کرده است. از طریق ادغام پیزوالکتریک و تحریک نوری

خواص نیمه‌رسانا، میدان الکتریکی داخلی توسط تحریک مکانیکی القا شده و بارهای الکتریکی ناشی از پیزوالکتریک از طریق اثر الکتروکاتالیزوری، واکنش‌های تخریب شیمیایی را در پساب رنگی ایجاد می‌کنند. به طور کلی پیزوکاتالیزور که بر پایه انرژی بار یا بازده جداسازی حامل‌های بار است توجه زیادی را به خود جلب کرده است. پتانسیل پیزو ناشی از کرنش یا تنش می‌تواند میدان الکتریکی بالایی را القا کند که به این واسطه جابجایی یا انتقال انرژی بار الکترون‌ها و حفره‌ها امکان‌پذیر می‌گردد. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در این زمینه صورت گرفته است که عمدتاً بر دو محور متمرکز شده است: (۱) تغییر انرژی بار سطحی توسط پتانسیل پیزو در پیزوکاتالیزور، (۲) جداسازی حامل‌های بار تولید شده با نور و افزایش فعالیت کاتالیزوری یک نیمه‌هادی پیزوالکتریک یکپارچه یا سیستم متشکل از پیزوالکتریک و نیمه‌رساناها. از اینرو با توجه به موارد اشاره شده، تجزیه پیزوفوتوکاتالیزوری نوری ماده رنگزا، کارایی پیزوالکتریک را در شکل‌گیری فرآیند پیزوکاتالیزور نشان می‌دهد که می‌تواند به جداسازی جفت الکترون حفره‌های ایجاد شده در اثر نور کمک کند و منجر به هم‌افزایی بین کاتالیزور نوری و پیزوکاتالیزور شود [۱۳-۱۴].

امروزه پلیمرهای پیزوالکتریک به دلیل دارا بودن سطح زیاد، انعطاف‌پذیری بالا و فرآیندپذیری مناسب، نسبت به سایر مواد پیزوالکتریک و همچنین به دلیل قیمت نسبتاً مناسب و فناوری تولید ساده، در بسیاری از کاربردهای کاتالیزوری مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۵]. این فرآیندپذیری مناسب به دلیل وزن ناچیز، چقرمگی بالا، سطح مخصوص بالا و نیز امکان برش و ایجاد اشکال پیچیده است. مواد پیزوالکتریک تحت ارتعاشات حاصل از امواج فراصوت، جفت الکترون حفره‌های جدا شده ایجاد می‌کنند که با یون‌های هیدروکسیل و مولکول‌های اکسیژن واکنش داده و رادیکال‌های سوپراکسید ( $O_2^-$ ) و هیدروکسیل (OH) را برای تخریب مواد رنگزای آلی ایجاد می‌کند. بطوری که به واسطه این رادیکال‌های آزاد به آلاینده‌های آلی حمله کرده و آنها را از طریق مسیرهای مختلف، تخریب و به مولکول‌های کوچک و کم‌خطر تبدیل می‌کند [۱۶-۲۳].

با توجه به حساسیت تصفیه پساب و به منظور رفع چالش‌های موجود از جمله آلودگی به واسطه ذرات پیزوالکتریک و محدودیت‌های موجود در زمینه تکرارپذیری، هدف اصلی تحقیقات ارائه شده در این زمینه دستیابی به یک فناوری بسیار کارآمد، غیرسمی و قابل استفاده مجدد برای تجزیه آلاینده‌های آلی با استفاده از ارتعاشات مکانیکی محیطی است. لذا در این مقاله ضمن طبقه‌بندی کاتالیزورهای مختلف (مانند نمونه‌های معمولی  $BioBr$ ،  $ZnO$  و  $BaTiO_3$ ) و مقایسه آن‌ها، پیشرفت‌های اخیر در فرآیندهای کاتالیزوری به ویژه در تصفیه پساب و حذف ماده رنگزای آلی بررسی شده است. در پایان نیز با ترکیب فرآیندهای کاتالیزوری نوری و پیزوکاتالیزور، به بیان فرآیند

بهره‌گیری از فناوری نانو در کاربردهای کاتالیزوری نوری به طور چشمگیری در حال افزایش است. نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم ( $\text{TiO}_2$ ) معروف‌ترین جاذب اکسید فلزی است که به دلیل پایداری شیمیایی و سازگاری با محیط‌زیست، بازده تخریب بالاتری را نسبت به سایر ذرات دارد. باین حال فراوری دشوار و هزینه بالای تولید، استفاده آن را با محدودیت مواجه کرده است. بنابراین ضرورت انتخاب جایگزین مناسب و با کیفیت به شدت احساس می‌شود. مطالعات نشان داده است حضور عوامل اصلاح‌کننده در نانوذرات اکسیدروی ( $\text{ZnO}$ ) باعث بهبود قابل توجه در عملکرد کاتالیزوری نوری خواهد شد. این بررسی‌ها نشان داده است که روش کاتالیزوری نوری با بهینه‌سازی عوامل عملیاتی موثر، کارایی مناسبی در رنگبری از پساب دارد و می‌تواند در مقیاس‌های بزرگ‌تر نیز انجام شود. اندازه بسیار کوچک، سطح ویژه بالا و گزینش‌پذیری عالی در نانوکاتالیزورها باعث افزایش سرعت و بازده واکنش می‌شود. در همین راستا، در مطالعه‌ای که توسط پوپا<sup>۱</sup> و همکارانش [۴] صورت گرفت، تاثیر غلظت بارگذاری بر روی حذف آلاینده‌های رنگی در غشاهای پلی‌وینیلیدن دی‌فلوراید (PVDF) پوشش داده شده با ذرات  $\text{ZnO}$  بررسی شد. غشاهای PVDF به روش جدایش فازی به صورت ترکیبی از فازهای آلفا و بتا تهیه شده که به واسطه پوشاندن آن با ذرات  $\text{ZnO}$  خاصیت آبدوستی غشا بهبود یافت. همچنین فرآیند تجزیه ماده رنگزا با دو روش ترکیبی جذب و تخریب کاتالیزوری نوری صورت گرفت، بطوریکه با افزایش ذرات  $\text{ZnO}$  راندمان حذف ماده رنگزا تا ۸۵ درصد افزایش یافت. بررسی‌های این محققان نشان داد که وجود رادیکال‌های هیدروکسیل ( $\text{OH}^\cdot$ ) و سوپراکسید ( $\text{O}_2^\cdot$ ) منجر به تجزیه نوری آلاینده‌های رنگی شده است. در پژوهشی دیگر تانگ<sup>۲</sup> و همکارانش [۸] به منظور بهبود عملکرد کاتالیزوری نوری  $\text{TiO}_2$  تحت پرتو UV و نور مرئی، گرافن سه‌بعدی (3DG) با چگالی نقص ساختاری مختلف را تهیه کردند. در این مطالعه، ارتباط بین کارایی کاتالیزوری نوری کامپوزیت و چگالی نقص ساختاری 3DG مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تجزیه فنل و رودامین B ( $\text{RhB}$ ) نشان داد که فعالیت‌های کاتالیزوری نوری کامپوزیت حاصله با چگالی نقص ساختاری 3DG ارتباط نزدیکی دارد. دو مزیت اصلی استفاده از نقص ساختاری شبکه 3DG عبارت است از ایجاد مکان‌های فعال جهت جذب شیمیایی آلاینده‌ها و در نتیجه افزایش نرخ تخریب آنها و همچنین اتصال شیمیایی بهتر بین 3DG و  $\text{TiO}_2$  که انتقال الکترون بین آنها را فراهم می‌سازد. از اینرو نقص ساختاری شبکه 3DG منجر به توسعه الکترون‌های حاصل از نور می‌گردد. همچنین این نقص‌ها مراکز نوترکیب برای جفت الکترون-حفره‌ها هستند و طول عمر الکترون‌های حاصل از نور را کاهش می‌دهند. چنانچه این نقایص کافی نباشد، نمی‌تواند کانال‌های انتقال الکترون کافی را ارائه دهد.

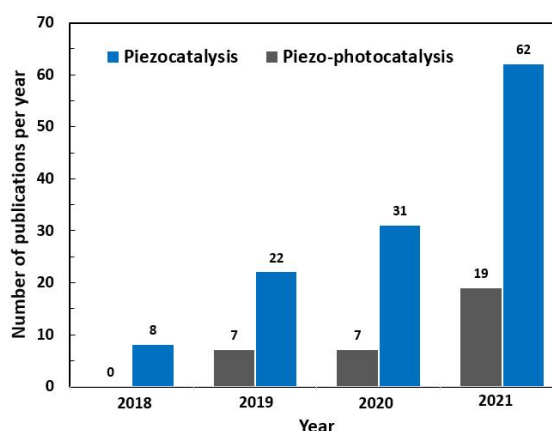
<sup>1</sup> Popa

<sup>2</sup> Tang

پیزوکاتالیزوری نوری و نقش آن در حذف مواد رنگزای آلی از پساب پرداخته شده است. بررسی روند مطالعات صورت گرفته توسط محققان در سال‌های اخیر، نشان‌دهنده توجه ویژه به این پدیده نوظهور بوده است. شکل ۱ روند مقالات چاپ شده طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. داده‌های بدست آمده بر اساس کلیدواژه‌های پیزوکاتالیزور و پیزوکاتالیزور نوری در پایگاه اسکوپوس بوده است.

## ۲- حذف کاتالیزوری نوری مواد رنگزای آلی

پساب‌های حاصل از صنایع دارویی و بهداشتی به دلیل اینکه حاوی آلاینده‌های آلی مانند مواد رنگزا هستند برای محیط‌زیست و سلامت عمومی خطرناک هستند. فرآیندهای کاتالیزوری نوری به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های از بین بردن آلودگی‌های زیستی از پساب‌های صنعتی بشمار می‌رود. فرآیند کاتالیزوری نوری یکی از روش‌های فرآیند اکسیدشدن پیشرفته است که در آن مواد آلی تحت تأثیر تابش پرتو فرابنفش (UV) و در حضور دی‌اکسیدهای فلزی تجزیه می‌گردند. در فرآیندهای کاتالیزوری نوری از لامپ‌های بخار جیوه و نور ال‌ای‌دی (LED) به عنوان منبع پرتو UV استفاده می‌شود. معایب لامپ‌های بخار جیوه که در حال حاضر به عنوان منبع پرتو UV در فرآیندهای تلفیقی جهت حذف آلاینده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، شامل اندازه بزرگ، مقاومت کم به شوک و حساسیت بالا نسبت به تغییرات دمایی است. همچنین لامپ‌های مذکور اخیراً به عنوان آلاینده اصلی محیط زیست به شمار می‌روند. به منظور رفع این مشکل از نور LED به عنوان منبع نوری استفاده شده است. LEDها دیودهای نورافشان دستگاه‌های نیمه‌هادی هستند که نور از یک طول موج منفرد منتشر می‌شود و می‌توان از آنها به منظور تولید پرتو UV یا به عنوان خاصیت ضدباکتری در طول موج‌های پرتو UV استفاده کرد [۲۴].



شکل ۱: توزیع فراوانی مدارک منتشر شده بر اساس کلیدواژه‌های پیزوکاتالیزور و پیزوکاتالیزور نوری طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱.

Figure 1: Frequency distribution of published documents based on the keywords piezocatalyst and piezophotocatalyst during the years 2018 to 2021.

پیزوالکتریک  $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$  (PZT) به روش هیدروترمال به منظور تخریب ماده رنگزای اسید نارنجی ۷ (AO7)، سنتز شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده ترکیبی از اثر پیزوالکتریک و اثر الکتروکاتالیزوری بوده است. الیاف پیزوالکتریک PZT در اثر ارتعاش مکانیکی خم شده و بار الکتریکی به واسطه اثر پیزوالکتریک بر روی سطح الیاف القا می‌گردد. در نتیجه از طریق اثر الکتروکاتالیزوری، واکنش‌های تخریب شیمیایی در پساب رنگی شکل می‌گیرد. در این روش تجزیه پیزوکاتالیزوری محلول ماده رنگزای مورد مطالعه تا ۸۰ درصد گزارش شده و یک فناوری بسیار کارآمد، غیرسمی و قابل استفاده مجدد برای تجزیه آلاینده‌های آلی با استفاده از ارتعاشات مکانیکی محیطی فراهم شده است.

در تحقیقی دیگر چن<sup>۴</sup> و همکارانش [۱۷] نانوکامپوزیت هیبریدی باریم تیتانات/کربن با خاصیت پیزوکاتالیزوری قوی را به منظور تجزیه ماده رنگزای RhB ارائه دادند. نتایج این محققان نشان داد که با افزایش درصد کربن از ۰ تا ۵ درصد وزنی، کارایی کاتالیزوری نانوکامپوزیت هیبریدی ابتدا افزایش و سپس به آرامی کاهش می‌یابد. هنگامی که کربن تا ۲ درصد وزنی افزایش یابد، نانوکامپوزیت هیبریدی باریم تیتانات/کربن، خاصیت پیزوکاتالیزوری بهینه را نشان داد. تجزیه ماده رنگزا تقریباً ۷۵/۵ درصد پس از ۴۰ دقیقه تحریک ارتعاشی بوده است. این در حالیست که برای تیتانات باریم بازده واکنش ۴۸/۴ درصد بدست آمد.

در مطالعه‌ای دیگر لیو<sup>۱</sup> و همکارانش [۹] از فیلم حاوی نانوصفحات اکسید گرافن (GO) و  $TiO_2$  با خاصیت کاتالیزوری نوری بالا استفاده کردند و نتایج رضایت‌بخشی از جمله قیمت ارزان، شفافیت، رسانایی، کنترل فشار و فعالیت بالای کاتالیزوری نوری را بدست آوردند. لو<sup>۲</sup> و همکارانش [۲۵] نیز با سنتز نانوذرات  $Bi_2Zr_2O_7$  (BZO) به روش نمک مذاب، به بهبود اثر کاتالیزوری نوری دست یافتند. این استراتژی مسیر جدیدی را برای تهیه سایر نانوبلورهای اکسیدی ارائه داده است. به طور کلی اندازه ذرات و سطح ویژه اثر قابل توجهی بر روی فعالیت کاتالیزوری نوری دارد. با توجه به مساحت سطح بزرگ‌تر ناشی از اندازه ذرات کوچک‌تر که می‌تواند مکان‌های فعال تری را برای واکنش کاتالیزوری نوری فراهم کند، نمونه BZO با ابعاد کوچک‌تر، مراکز فعال سطحی بیشتر و در نتیجه عملکرد کاتالیزوری نوری بالاتری را نشان داد. براین اساس بازده کوانتومی انتقال بار سطحی را بهبود بخشیده و منجر به افزایش برداشت پرتو UV در برابر نور شده است. در جدول ۱ خلاصه‌ای از عملکرد انواع کاتالیزورهای نوری مورد مطالعه در حذف رنگزا ارائه شده است.

### ۳- حذف پیزوکاتالیزور مواد رنگزای آلی

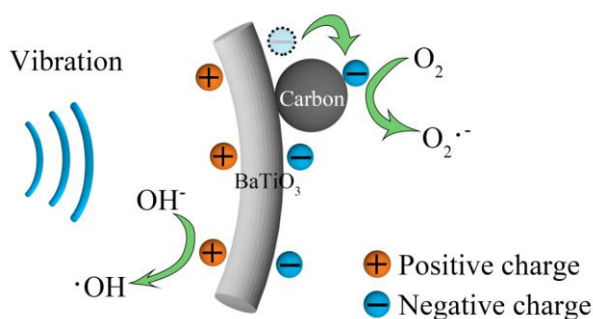
طی سال‌های اخیر، مواد پیزوالکتریک مسیر جدیدی را در توسعه کاتالیزورها فراهم کرده‌اند. اثر کاتالیزوری نوری ناشی از خاصیت پیزوالکتریک، عملکرد بالایی را در مسایل زیست‌محیطی داشته است. با این حال همچنان چالش‌های موجود از جمله آلودگی به واسطه ذرات پیزوالکتریک و محدودیت‌های تکرارپذیری نیازمند توسعه بیشتر است [۱۰-۱۲]. در همین راستا در تحقیقی که توسط لین<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۶] انجام شد، کاتالیزور مناسبی بر پایه الیاف

جدول ۱: مقایسه کارایی برخی کاتالیزورهای نوری مورد مطالعه در حذف مواد رنگزا.

Table 1: Efficiency comparison of different types of photocatalysts in dye removal.

Catalyst Sample	Catalytic Efficiency [%]	Reaction rate [ $\text{min}^{-1}$ ]	Dye	Rate of Dye Degradation [%]	Catalytic conditions	Ref
PVDF-ZnO	-	0.003	RhB	85	UV-vis light	[4]
PVDF-g- $C_3N_4$	71.26	0.003	Tolonium Chloride (TC)	71.26	UV-vis light	[5]
PVDF-g- $C_3N_4$	84.24	0.007	RhB	84.24	UV-vis light	[5]
PVDF-ZnSnO <sub>3</sub>	-	0.005	MB	71	UV-vis light	[6]
P(VDF-TrFE)-ZnO	-	0.007	MB	90	UV-vis light	[7]
three-dimensional graphene network (3DGN)	-	0.004	RB	65	UV-vis light	[8]
graphene oxide-TiO <sub>2</sub> composite	82	-	MO	82	UV-vis light	[9]
$Bi_2Zr_2O_7$	-	0.017	RhB	92	UV-vis light	[25]

ذرات پیزوالکتریک با نسبت ابعاد بالا کارایی پیزوکاتالیزوری را توسعه داده و تخریب و توانایی افزایش بار را افزایش داده است. در پژوهشی که توسط جین<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۹] انجام شد، نانوسیم‌های تیتانات باریم ( $\text{BaTiO}_3$ ) با استفاده از روش ترکیبی الکتروسی مبتنی بر سل-ژل و فرآیند کلسینه شدن تولید گردید. در این مطالعه، ساختار بلوری، اندازه بلور، مساحت سطحی و ابعاد میکروساختارها به طور موثر به وسیله تغییر دما، زمان یا غلظت پیش‌ماده کلسینه شدن تنظیم شده است. همچنین نقش مشخصه‌یابی میکروساختارها در فعالیت پیزوکاتالیزوری به وسیله تخریب محلول متیل نارنجی (MO) تحت ارتعاش حاصل از امواج فراصوت مورد بررسی قرار گرفت.



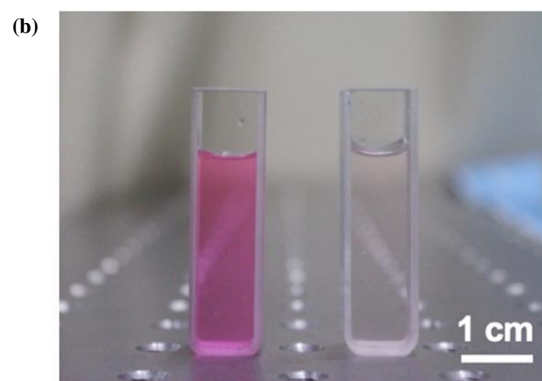
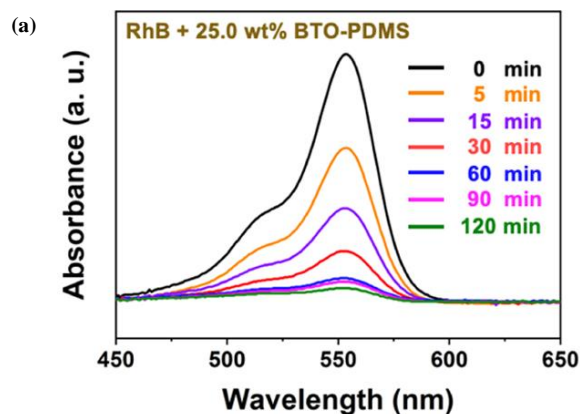
شکل ۲: سازوکار حذف ماده رنگزا توسط نانوکامپوزیت هیبریدی تیتانات باریم /کربن در اثر ارتعاش [۱۷].

Figure 2: Vibration removal mechanism by barium titanate / carbon hybrid nanocomposite due to vibration [17].

<sup>1</sup> Qian  
<sup>2</sup> Jin

افزایش کارایی پیزوکاتالیزوری در نانوکامپوزیت هیبریدی تیتانات باریم /کربن، به عملکرد انتقال بار کربن نسبت داده شده که باعث تقویت اثر جداسازی بارهای الکتریکی ناشی از پیزوالکتریک شده است. بررسی تکرارپذیری نشان داد پس از سه بار، نسبت تجزیه ماده رنگزا توسط نانوکامپوزیت هیبریدی باریم تیتانات/کربن تا ۷۰ درصد بوده است. در شکل ۲ سازوکار حذف ماده رنگزا به واسطه اعمال ارتعاش نشان داده شده است.

در مطالعه‌ای دیگر کیان<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۸] برای حل چالش آلودگی ثانویه و محدودیت‌های بازیابی جاذب، روش جدیدی با استفاده از فوم متخلخل کامپوزیتی تیتانات باریم - پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (BTO-PDMS) ارائه دادند. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، فعالیت پیزوکاتالیزوری نوری فوم متخلخل، ماده رنگزای RhB را تا ۹۴ درصد تخریب کرده است. همچنین مواد کامپوزیتی ثابت بسیار خوبی پس از ۱۲ بار چرخه بازیابی نشان دادند. تحت ارتعاشات حاصل از امواج فراصوت، مواد پیزوالکتریک BTO جفت الکترون-حفره‌های جدا شده ایجاد کرده و با یون‌های هیدروکسیل و مولکول‌های اکسیژن واکنش دادند که در نتیجه آن رادیکال‌های سوپراکسید ( $\text{O}_2^-$ ) و هیدروکسیل (OH) برای تخریب ماده رنگزای آلی ایجاد شد. به طور کلی بازده تخریب ماده رنگزا و فعالیت کاتالیزوری مواد به چندین عامل از جمله ثابت پیزوالکتریک، سطح مخصوص، شکل مواد و پایداری ماده تحت ارتعاشات حاصل از امواج فراصوت بستگی دارد. ثابت پیزوالکتریک (d33) ذرات باریم تیتانات در میان سایر مواد بالاتر است، اما بهترین فعالیت پیزوکاتالیزوری نوری را نشان نداده است. این مهم نشانگر آن است که ثابت پیزوالکتریک مواد تنها یکی از عوامل موثر در فعالیت پیزوکاتالیزوری نوری است. در این گزارش، اندازه ذرات در حد میکرون، تجزیه پیزوکاتالیزوری نوری را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه منجر به کاهش چرخه‌های کاتالیزوری شده است. همچنین

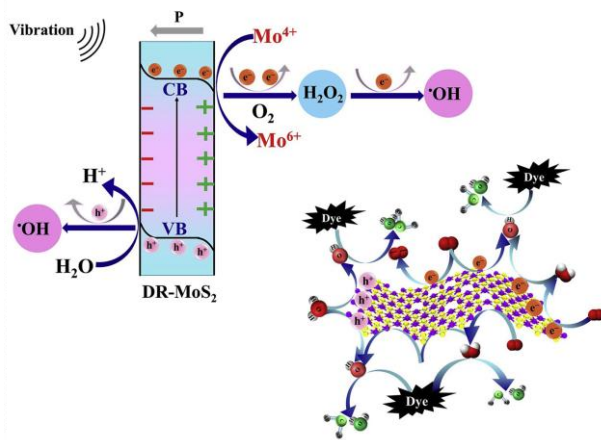


شکل ۳: (a) طیف UV-Vis فوم متخلخل BTO-PDMS ، (b) محلول ماده رنگزای RhB قبل و پس از اعمال ارتعاش [۱۸].

Figure 3: a) UV-Vis spectrum of porous BTO-PDMS foam, b) RhB dye solution before and after vibration [18].



BaTiO<sub>3</sub> در حذف ماده رنگزای آلی RhB تحت امواج فراصوت (به منظور تحریک مکانیکی) مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش زمان اعمال ارتعاشات فراصوت، شدت پیک جذب محلول رنگی کاهش قابل توجهی را نشان داده که این امر بیانگر تخریب مولکول‌های ماده رنگزا بوده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، هنگامی که نمونه در محلول آلاینده‌های آلی غوطه‌ور شده است، ماده رنگزا توانسته خود به خود در منافذ متصل به هم در فوم PVDF-BaTiO<sub>3</sub> نفوذ کند و یک ناحیه تماس بالا برای واکنش فراهم کند. همچنین پس از اعمال امواج فراصوت، حباب‌هایی در محلول ظاهر شده که منجر به فروپاشی شده است (شکل ۵).



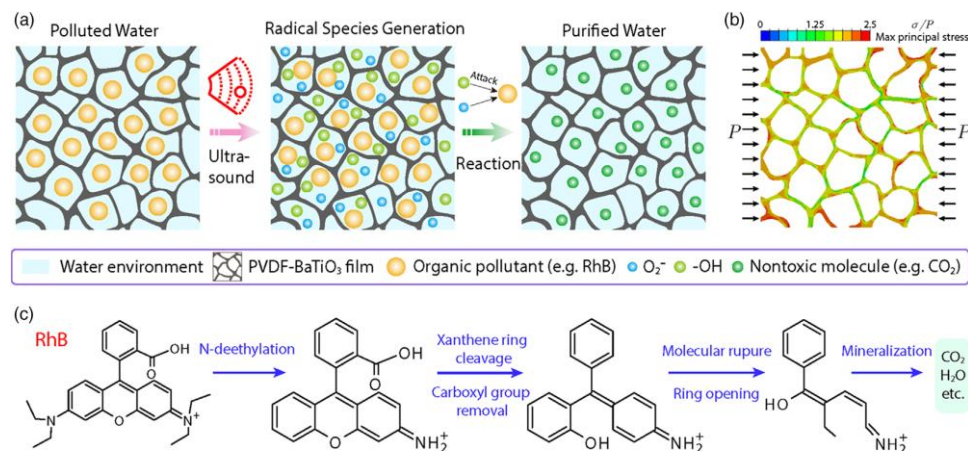
شکل ۴: سازوکار حذف ماده رنگزا توسط DR-MoS<sub>2</sub> در اثر ارتعاش [۲۰].

Figure 4: Vibration removal mechanism by DR-MoS<sub>2</sub> [20].

<sup>1</sup> Yein

<sup>2</sup> Shi

نتایج بدست آمده توسط این محققان نشان داد که ساختار بلوری و مساحت سطحی نقش اساسی در فعالیت پیزوکاتالیزوری نوری نانوسیم‌های BaTiO<sub>3</sub> داشته است، بطوریکه عملکرد پیزوکاتالیزوری نانوسیم‌های BaTiO<sub>3</sub> با قطر کمتر یا تشکیل شده از اندازه بلورهای کوچک‌تر بهبود یافته است. همچنین یاین<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۰] یک نیمه‌رسانای پیزوکاتالیزوری متشکل از دی‌سولفید مولیبدن (MoS<sub>2</sub>) ارائه دادند. لایه ایجاد شده از MoS<sub>2</sub> دارای نقص زیاد (DR-MoS<sub>2</sub>) با غلظت بالای گوگرد (S/Mo=۰/۸۳)، توانایی برقراری واکنش با مولکول‌های اکسیژن جذب شده را داشته و منجر به ایجاد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) جهت تخریب پیزوکاتالیزوری نوری موثر گردید. در این حالت نمونه فعالیت پیزوکاتالیزوری نوری بسیار بالاتری را در تخریب ماده رنگزا نسبت به نمونه عاری از نقص ساختاری (DF-MoS<sub>2</sub>) نشان داد. زیرا در این حالت چگالی الکترون‌ها تقریباً ۱۵ برابر بیشتر از حالت بدون نقص بوده و پتانسیل باند مسطح و چگالی بار افزایش یافته و دینامیک انتقال الکترون تقویت شده است. این امر منجر به خمیدگی باند سطحی و در نتیجه جداسازی موثر حامل بار همراه با پیزوپلاریزاسیون شده است. در شکل ۴ سازوکار حذف ماده رنگزا توسط DR-MoS<sub>2</sub> در اثر ارتعاش نشان داده شده است. در تحقیق دیگری شی<sup>۲</sup> و همکارانش [۲۱] به منظور جلوگیری از آلودگی ثانویه ناشی از پودرهای پیزوکاتالیزوری، فوم کاتالیزوری مجزا متشکل از نانوذرات BaTiO<sub>3</sub> بر روی داربست PVDF تهیه کردند. فوم کامپوزیتی PVDF-BaTiO<sub>3</sub> تهیه شده، کارایی پیزوکاتالیزوری برجسته‌ای را در حذف مواد آلی نشان داده است، بطوری‌که منافذ متصل به هم در داخل فوم منجر به هم‌افزایی مواد پیزوالکتریک گردیده است. این فوم جهت تصفیه نمونه‌های آب طبیعی استفاده شده و شاخص پرمنگنات نمونه آب را پس از ۲ ساعت تقریباً ۳۰ درصد کاهش داده است. در این پژوهش عملکرد پیزوکاتالیزوری فوم PVDF-



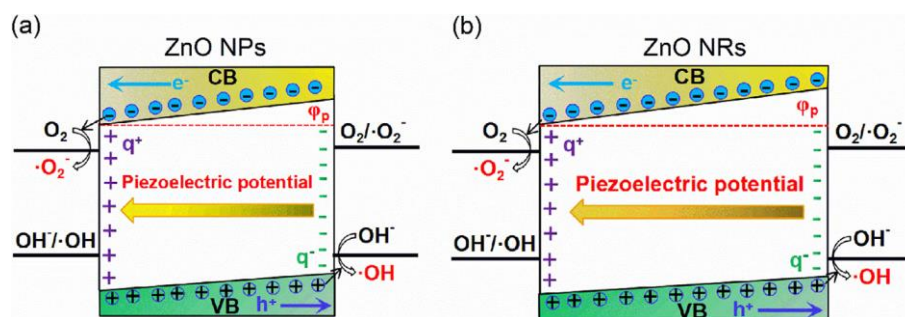
شکل ۵: سازوکار حذف ماده رنگزای RhB توسط فوم کامپوزیتی PVDF-BaTiO<sub>3</sub> در اثر ارتعاش [۲۱].

Figure 5: Vibration removal mechanism of RhB dye by PVDF-BaTiO<sub>3</sub> composite foam [21].

به تخریب پیزوکاتالیزوری نوری ماده رنگزا و آلاینده آلی می‌شوند. در گزارشی سینگ<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۳] خاصیت پیزوکاتالیزوری نیوبات لیتیم ( $\text{LiNbO}_3$ ) را جهت تخریب پساب رنگی برای اولین بار مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق  $\text{LiNbO}_3$  به روش واکنش حالت جامد سنتز شده است. بررسی‌های به دام انداختن رادیکال نشان داد که گونه‌های اصلی فعال مؤثر در تخریب پیزوکاتالیزوری ماده رنگزای مورد مطالعه، به ترتیب رادیکال هیدروکسیل ( $\text{OH}\cdot$ )، سوپراکسید ( $\text{O}_2^-$ ) و حفره‌ها ( $\text{h}^+$ ) است. از اینرو این ماده به‌عنوان گزینه مناسبی جهت تخریب پیزوکاتالیزوری ماده رنگزای موجود در محلول پساب مطرح است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، شدت پیک جذب ماده رنگزای MB (۶۶۴ نانومتر) در نمودار جذب با افزایش زمان تخریب پیزوکاتالیزوری کاهش یافته است، که بیانگر تخریب ماده رنگزای MB در محلول در طی اعمال ارتعاش است. در جدول ۲ خلاصه‌ای از عملکرد انواع پیزوکاتالیزورها در حذف ماده رنگزا ارائه شده است.

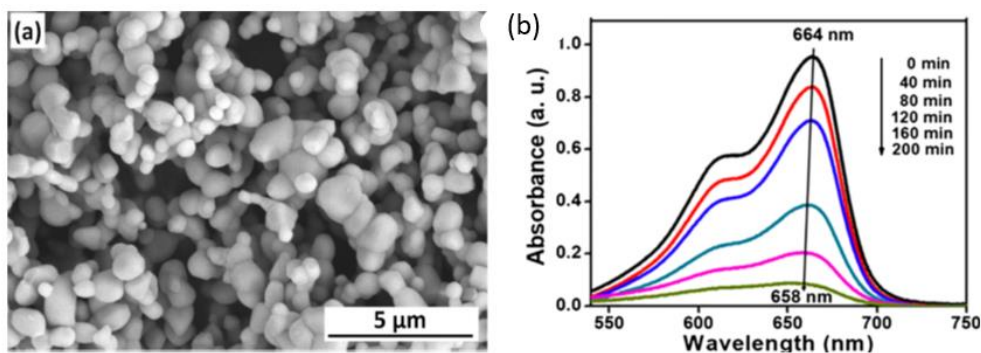
<sup>1</sup> Ning  
<sup>2</sup> Singh

این در حالی است که فشار زیادی (Pa 108) وارد شده و دوقطبی پیزوالکتریک بیشتر (الکترون و حفره‌ها) روی سطح فوم ایجاد شده است. در نهایت رادیکال‌های آزاد ( $\text{OH}\cdot$  و  $\text{O}_2^-$ ) ایجاد شده به آلاینده‌های آلی حمله کرده و آنها را از طریق مسیره‌های مختلف تخریب و به مولکول‌های کوچک و غیرسمی تبدیل نموده است. در تحقیق انجام شده توسط نینگ<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۲]، فعالیت پیزوکاتالیزوری اکسیدروی (ZnO) پیزوالکتریک با ریخت‌های مختلف (نانوذرات و نانومیل‌ها) جهت از بین بردن آلاینده آلی متیلن آبی (MB) تحت ارتعاشات فراصوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این محققان نشان داد که نانومیل‌های ZnO کارایی پیزوکاتالیزوری نوری بالاتری را نسبت به نانوذرات ZnO در تخریب پساب رنگی از خود نشان داده‌اند. نسبت رنگبری پیزوکاتالیزوری نانومیل‌های ZnO در مدت ۲ ساعت، بیش از ۳۸ درصد و در مدت ۵ ساعت بیش از ۹۹ درصد بوده است. این امر بیانگر ویژگی قابلیت بازیابی مناسب و استفاده مجدد و همچنین پتانسیل بالا در حذف ماده رنگزا از پساب است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، اکسیدکننده اصلی در واکنش‌های پیزوکاتالیزوری، رادیکال‌های هیدروکسیل ( $\text{OH}\cdot$ ) و سوپراکسید ( $\text{O}_2^-$ ) هستند که با ایجاد بارهای الکتریکی قطبی منجر



شکل ۶: سازوکار حذف ماده رنگزا توسط (a) نانوذرات اکسیدروی و (b) نانومیل‌های اکسیدروی در اثر ارتعاش [۲۲].

Figure 6: Dye removal mechanism by (a) zinc oxide nanoparticles, (b) zinc oxide nanorods by vibration [22].



شکل ۷: (a) تصویر SEM پودر  $\text{LiNbO}_3$ ، (b) طیف UV-Vis جذب ماده رنگزای MB در زمان‌های مختلف پس از اعمال ارتعاش [۲۳].

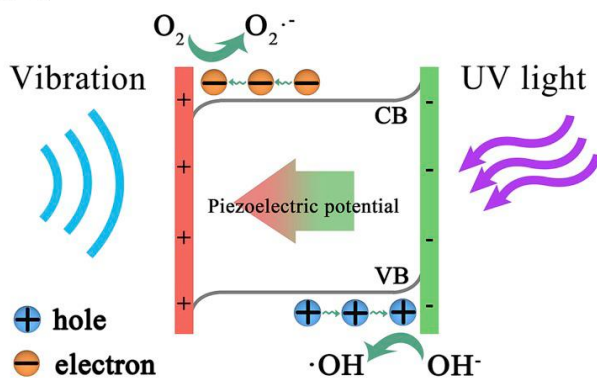
Figure 7: a) SEM image of  $\text{LiNbO}_3$  powder, b) UV-Vis spectrum of MB dye adsorption at different times after vibration [23].



جدول ۲: مقایسه کارایی برخی پیزوکاتالیزورهای مورد مطالعه در حذف ماده رنگزا.

Table 2: Efficiency comparison of different types of piezo catalysts in dye removal.

Catalyst Sample	Catalytic Efficiency [%]	Reaction rate [min <sup>-1</sup> ]	Dye	Rate of Dye Degradation [%]	Catalytic conditions	Ref
PZT	-	-	AO7	80	ultrasonic vibration	[16]
BTO/carbon nanocomposites	-	0.049	RhB	75.5	ultrasonic vibration	[17]
BTO-PDMS composites	-	0.0225	RhB	94	ultrasonic vibration	[18]
nanowires BaTiO <sub>3</sub>	-	0.0382	MO	69	ultrasonic vibration	[19]
DR-MoS <sub>2</sub>	99.8	0.56	Eriochrome Black T	99.8	ultrasonic vibration	[20]
PVDF-BaTiO <sub>3</sub>	-	-	RhB	87	ultrasonic vibration	[21]
ZnO nanorods	-	0.00341	MB	99	ultrasonic vibration	[22]
LiNbO <sub>3</sub>	-	-	RhB	99	ultrasonic vibration	[23]



شکل ۸: سازوکار پیزوکاتالیزوری نوری نانو میله‌های ZnO در حضور پرتو UV و ارتعاش [۲۶].

Figure 8: Piezophotocatalytic mechanism of ZnO nanorods in the presence of UV light and vibration [26].

همچنین در پژوهشی دیگر، بای<sup>۲</sup> و همکارانش [۲۷] میکروکره‌های متشکل از نانوصفحات ZnO با سه اثر کاتالیزوری نوری، پیزوکاتالیزوری و پیزوکاتالیزوری نوری را به منظور تخریب مواد رنگزای مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که الکترون‌های آزاد ناشی از عدم حضور اکسیژن در میدان پیزوالکتریک داخلی متناوب، به سمت سطح نانوصفحات ZnO حرکت کرده و به دلیل نیروی اعمالی متناوب به وسیله امواج فراصوت بر روی نانوصفحات، پتانسیل پیزوالکتریک نیز به صورت تناوبی افزایش و کاهش پیدا کرده است. همچنین الکترون‌ها به طور پیوسته بر روی سطح انباشته شده و منجر به تخریب آلاینده‌های آلی شده است. ساختار اتمی بلورهای ZnO و چگونگی تغییر ساختار در حضور امواج

#### ۴- حذف پیزوکاتالیزور نوری ماده رنگزای آلی

اثر ترکیبی پیزوکاتالیزوری نوری با مزیت افزایش جفت الکترون-حفره‌های ایجاد شده و میدان الکتریکی پیزوالکتریک منجر به افزایش جداسازی الکترون-حفره می‌شود [۲۶-۳۲]. در همین راستا ما<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۶] به مطالعه‌ای بر روی نانومیله‌های ZnO پرداختند. این محققان به این نتیجه رسیدند که ارتعاش خارجی قادر است نانومیله‌های ZnO را خم کند و پتانسیل پیزوالکتریک به مقدار زیادی بار الکتریکی القا کند. این مهم باعث ایجاد گونه‌های فعال بیشتر برای تجزیه مولکول ماده رنگزا می‌گردد. پتانسیل پیزوالکتریک القا شده به واسطه اعمال ارتعاش، نقش تعیین‌کننده‌ای در تجزیه پیزوکاتالیزوری داشته و از طریق تنظیم قدرت منبع ارتعاش حاصل از امواج فراصوت قابل تنظیم است. پتانسیل پیزوالکتریک بالاتر، سرعت تجزیه را بالا برده، اما اثر ناچیزی بر روی نسبت نهایی تجزیه ماده رنگزا داشته است.

همچنین در حضور پرتو UV و ارتعاش فراصوت، تجزیه ماده رنگزا برای نانومیله‌های ZnO در محدوده اسیدی و مدت ۱۰۰ دقیقه، به اندازه ۸۰/۸ درصد بدست آمد. این در حالی است که این مقدار بیشتر از ۵۶/۷ درصد برای تجزیه کاتالیزوری نوری و ۳۱/۸ درصد برای تجزیه پیزوکاتالیزوری نوری بوده است. تجزیه پیزوکاتالیزوری نوری نانومیله‌های ZnO، کارایی پیزوالکتریکی در شکل‌گیری فرآیند پیزوکاتالیزور و جداسازی جفت الکترون-حفره‌های ایجاد شده در اثر نور را نشان داده است. در نتیجه منجر به هم‌افزایی بین خاصیت کاتالیزوری نوری و پیزوکاتالیزوری شده است. سازوکار پیزو کاتالیزوری نوری نانومیله‌های ZnO و جداسازی جفت الکترون-حفره‌های ایجاد شده در اثر پرتو UV و ارتعاش در شکل ۸ ارائه شده است.

<sup>2</sup> Bai

<sup>1</sup> Ma

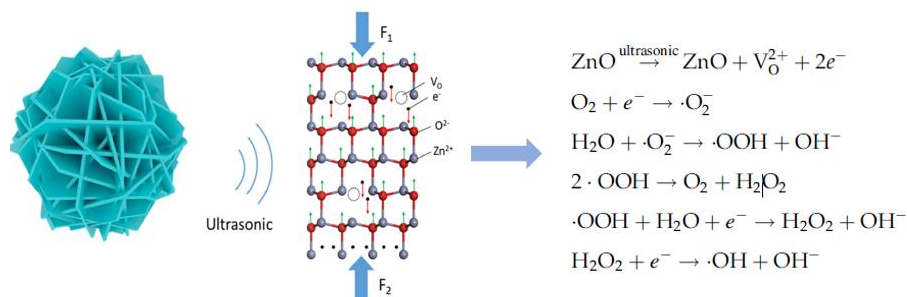
ترکیب ارائه شده توانایی حفظ کارایی بالای پیزوکاتالیزور نوری را پس از ۱۰ بار تکرار فعالیت کاتالیزوری دارد. اثر پیزوکاتالیزوری نوری تخریب ماده رنگزا را به واسطه تابش نور یا ارتعاش مکانیکی با دوره فرکانس پایین، تا ۹۷/۸ درصد و فرکانس بالا تا ۲۷۵ درصد نشان داده است. زیرا اثر ترکیبی پیزوکاتالیزوری نوری با مزیت افزایش جفت الکترون-حفره‌های ایجاد شده و میدان الکتریکی پیزوالکتریک، منجر به میزان بالاتری از جداسازی الکترون-حفره شده‌است. همچنین فوم متخلخل BST-PDMS با اثر پیزوکاتالیزوری نوری، از طریق استفاده از انرژی خورشیدی و منابع مکانیکی محیطی یک رویکرد بالقوه در تخریب ماده رنگزا از پساب را ارائه داده است. فرآیند تخریب ماده رنگزا به واسطه فوم متخلخل BST-PDMS از طریق ایجاد رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) و سوپراکسید (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) در حضور انرژی خورشیدی و امواج فراصوت در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

فراصوت در شکل ۹ نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، اتم‌های O با اعمال نیروهای F<sub>1</sub> و F<sub>2</sub> در امتداد محور z حرکت کرده و به واسطه حرکت نسبی اتم‌های O، یک گشتاور دوقطبی در واحدهای چهار وجهی Zn<sup>2+</sup> و O<sub>2</sub><sup>-</sup> ایجاد کرده‌اند.

هنگامی که تعداد زیادی از واحدهای چهاروجهی روی هم قرار گرفتند، یک پتانسیل پیزوالکتریک در بلور ZnO القا شده و در پی آن الکترون‌هایی که در ابتدا با پتانسیل مثبت محدود شده‌اند، به الکترون‌های آزاد تبدیل شده و روی سطح بلور ZnO با O<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>O واکنش می‌دهند. سپس رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) و سوپراکسید (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) در تجزیه کاتالیزوری مواد رنگزای همچون RhB و AO7 شرکت می‌کنند.

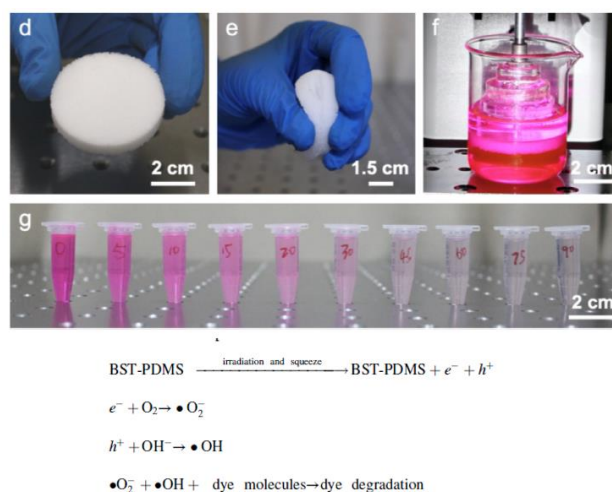
زو<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۸] نیز با استفاده از پیزوسرامیک-فوم پلیمری متخلخل پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان-باریم‌استرانسیم تیتانات (BST-PDMS) روشی موثر جهت جمع‌آوری ذرات BST و جلوگیری از آلودگی ثانویه ارائه داده‌اند. بررسی‌های به‌عمل آمده نشان داد که

<sup>۱</sup>Xu



شکل ۹: سازوکار پیزوکاتالیزور نوری و چگونگی تغییر آرایش اتمی بلورهای ZnO در حضور تابش فرابنفش و ارتعاش [۲۷].

Figure 9: Piezophotocatalytic mechanism and how to change the atomic arrangement of ZnO crystals in the presence of ultraviolet radiation and vibration [27].



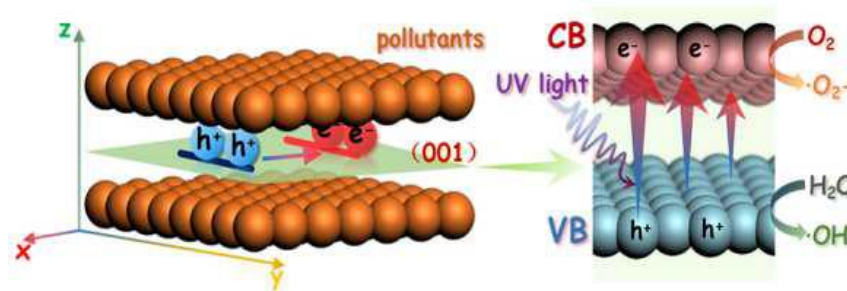
شکل ۱۰: سازوکار پیزوکاتالیزور نوری و تخریب ماده رنگزا توسط فوم متخلخل BST-PDMS در حضور انرژی خورشیدی و امواج فراصوت [۲۸].

Figure 10: Piezophotocatalytic mechanism and dye degradation by BST-PDMS porous foam in the presence of solar energy and ultrasound [28].

بازیابی در شکاف انرژی  $3.12 \text{ eV}$  را نشان دادند (شکل ۱۲ (a)). نرخ تخریب پیزوکاتالیزوری نوری توسط کامپوزیت موجود در صورت اعمال ارتعاش تا  $99/8$  درصد بهبود یافته است، در حالی که نرخ تخریب بدون اعمال ارتعاش  $56/1$  درصد بوده است. عامل اصلی این بهبود رادیکال‌های سوپراکسید ( $\text{O}_2^-$ ) و هیدروکسیل ( $\text{OH}$ ) ایجاد شده در نمونه بوده که بعد از ۵ چرخه، نرخ تخریب تنها به  $98/6$  درصد کاهش یافته است که بیانگر قابلیت بازیابی خوب نمونه است. شکل ۱۲ (b) نمودار جذب و تخریب کاتالیزوری نوری ماده رنگزای RhB توسط نانوالیاف کامپوزیتی  $\text{BaTiO}_3\text{-TiO}_2$  تحت ارتعاش و بدون ارتعاش را نشان می‌دهد. همچنین روند تغییر رنگ آلاینده‌ها طی فرآیند تخریب و تحت ارتعاش نشان داده شده است. در فرآیند واکنش تاریک، نانوالیاف کامپوزیتی تعداد زیادی آلاینده را جذب کرد و نرخ جذب تحت ارتعاش یا بدون ارتعاش به  $20$  درصد رسید، که می‌تواند مربوط به انرژی سطحی اتصالات در نانوالیاف کامپوزیتی باشد.

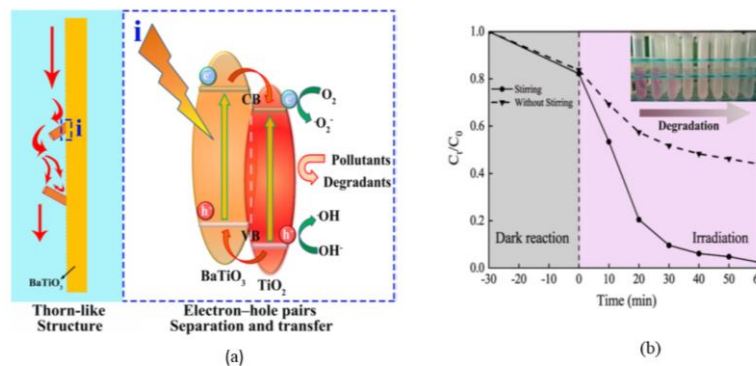
<sup>1</sup> Hao  
<sup>2</sup> Liu

امروزه دسترسی به مواد کاتالیزوری چند منظوره و سنتز گونه‌های بلوری بسیار فعال، موضوعات چالش برانگیزی در تحقیقات مرتبط با کاتالیزورها است. در همین راستا هاو<sup>۱</sup> و همکارانش [۳۰]، نانوصفحات کاتالیزوری  $\text{Bi}_2\text{O}_3(\text{OH})(\text{NO}_3)$  (BON-S) با عملکرد بالایی تخریب آلاینده‌ها در برابر پرتو UV را مورد بررسی قرار دادند. همانطور که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است، فعالیت کاتالیزوری نوری به واسطه کوتاه شدن مسیر انتشار الکترون‌های نوری تولید شده، بطور قابل توجهی افزایش یافته و الکترون‌ها و حفره‌ها تحت تاثیر میدان الکتریکی بین لایه‌های  $[\text{Bi}_2\text{O}_3(\text{OH})]^+$  و  $\text{NO}_3^-$  از داخل به سمت سطح مهاجرت کرده‌اند. همچنین در این تحقیق برای اولین بار عملکرد پیزوکاتالیزوری نوری این نانوصفحات به کمک امواج فراصوت برای تجزیه مواد رنگزای MO، بیس فنل A (BPA) و تتراسایکلین هیدروکلراید نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که عملکرد پیزوکاتالیزوری نوری ترکیب ارائه شده به مراتب بیش از عملکرد کاتالیزوری نوری آن است. در تحقیق دیگری لیو<sup>۲</sup> و همکارانش [۳۱] مواد پیزوکاتالیزوری نوری با قابلیت استفاده از انرژی مکانیکی جریان آب را ارائه کردند. در این مطالعه نانوالیاف کامپوزیتی  $\text{BaTiO}_3\text{-TiO}_2$  به روش الکتروسیسی هم‌محور تهیه شده و کارایی کاتالیزوری نوری قابل توجه و قابلیت



شکل ۱۱: سازوکار پیزوکاتالیزوری نوری نانوصفحات BON-S در حضور پرتو UV و امواج فراصوت [۳۰].

Figure 11: Piezophotocatalytic mechanism of BON-S nanosheets in the presence of UV light and ultrasound [30].



شکل ۱۲: (a) سازوکار تخریب پیزوکاتالیزوری نوری ماده رنگزا توسط نانوالیاف کامپوزیتی  $\text{BaTiO}_3\text{-TiO}_2$  در حضور پرتو UV و ارتعاش، (b) منحنی جذب ماده رنگزا در حضور و عدم حضور ارتعاش [۳۱].

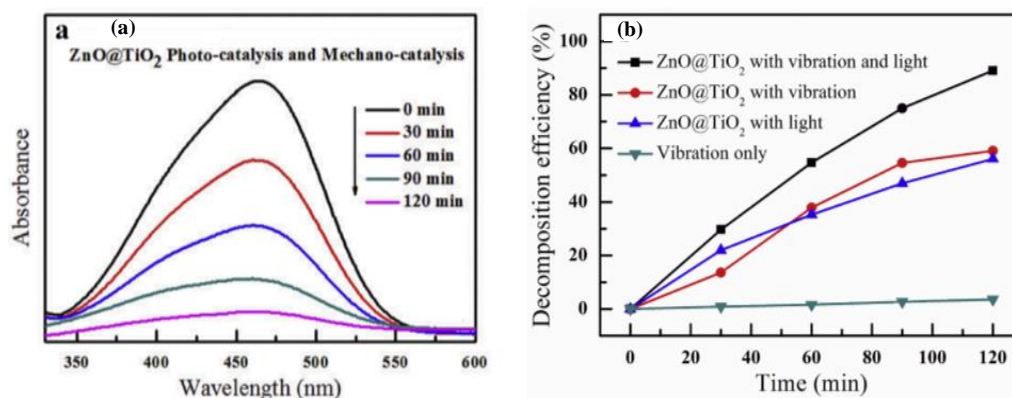
Figure 12: (a) Mechanism of piezophotocatalytic dye degradation by  $\text{BaTiO}_3\text{-TiO}_2$  composite nanofibers in the presence of UV light and vibration, (b) Dye absorption curve in the presence and absence of vibration [31].

۳/۲۲ برابر مقادیر مربوط به نانوالیاف  $\text{TiO}_2$  و نانوالیاف  $\text{BaTiO}_3/\text{TiO}_2$  تحت پرتو UV است، که این بیانگر خاصیت پیزوکاتالیزوری نوری نانوالیاف است.

لینگ<sup>۴</sup> و همکارانش [۳۶] نیز ساختار پیزوکاتالیزوری نوری  $\text{PZT}/\text{TiO}_2$  را مورد بررسی قرار دادند. میدان الکتریکی پیزوالکتریک در سرعت‌های مختلف هم‌زدن، تولید شده و نرخ کاتالیزوری نوری تخریب ماده رنگزا با افزایش دامنه سرعت هم‌زدن از ۲۰۰ تا ۸۰۰ دوربر دقیقه افزایش یافته است. اثر میدان پیزوالکتریک با تسهیل جداسازی بار و انتقال برای مهار فوتوالکترون-حفره نو ترکیب نشان داده شده است، که این مهم امکان تبدیل انرژی مکانیکی به میدان پیزوالکتریک برای بهبود عملکرد کاتالیزوری نوری را فراهم کرده است. به‌عبارت دیگر در این مطالعه سیستم پیزوکاتالیزوری نوری برای تخریب آلاینده‌های آلی در کاربرد عملی ارائه شده است. نمودار طرح‌واره واکنش کاتالیزوری نوری بهبود یافته توسط اثر پیزوالکتریک ناشی از اعمال انرژی مکانیکی در شکل ۱۴ (a) نشان داده شده است. هنگامی که  $\text{PZT}/\text{TiO}_2$  تحت تنش‌های فشاری مختلف قرار می‌گیرد، میدان پیزوالکتریک در هسته تک‌بلوری  $\text{PZT}$  ایجاد می‌شود. برای درک بهتر انتقال حامل الکترون در پوسته  $\text{TiO}_2$  تحت تأثیر میدان پیزوالکتریک، نمودار ساختار نواری در سطح مشترک محلول در شکل ۱۴ (b) ارائه شده است. به‌طوری‌که تحت پرتو UV، جفت الکترون-حفره آزاد در پوسته  $\text{TiO}_2$  برانگیخته می‌شود، سپس حامل‌های الکترون از سد انرژی بین کاتالیزور  $\text{TiO}_2$  و محلول عبور می‌کند تا به واکنش مدنظر برسد. در جدول ۳ خلاصه‌ای از عملکرد انواع پیزوکاتالیزورهای نوری در حذف ماده رنگزا ارائه شده است.

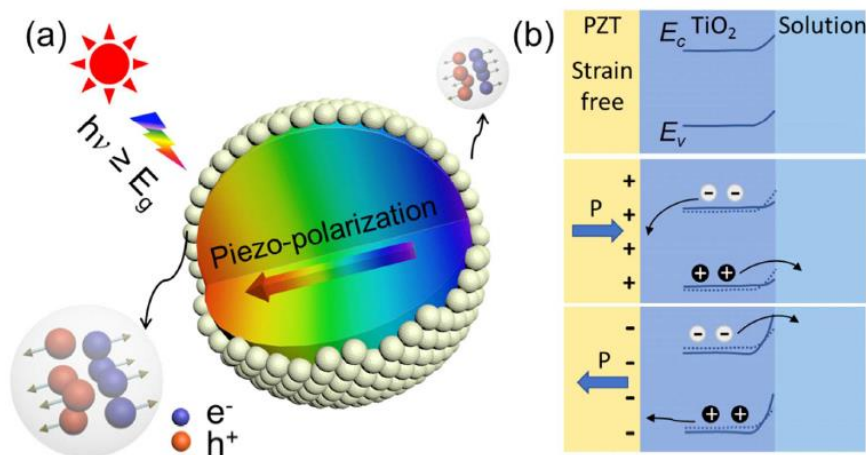
همچنین در مطالعه دیگری یو<sup>۱</sup> و همکارانش [۳۲] جهت تجزیه و تخریب ماده رنگزای MO، نانوالیاف پوسته-هسته  $\text{ZnO}@/\text{TiO}_2$  با خاصیت پیزوکاتالیزوری نوری را تهیه کردند. ساختار ناهمگن این نانوالیاف منجر به کاهش جفت الکترون-حفره‌ها و جداسازی الکترون‌ها و حفره‌های پیزوالکتریک/فوتوالکتریک و در نتیجه بهبود خاصیت کاتالیزوری شده است. بررسی‌ها نشان داد که اثربخشی پیزوکاتالیزوری نوری نانوالیاف موجود در محلول ماده رنگزای MO به ۹۰ درصد رسیده است، در حالی که این مقدار بسیار بیشتر از کارایی پیزوکاتالیزوری (در حدود ۶۰ درصد)، و کاتالیزوری نوری (در حدود ۵۵ درصد) است (شکل ۱۳ (b)). از سایر مزایای این ترکیبات بازده بالا، عدم سمیت و قابلیت کشش و امکان استفاده از انرژی مکانیکی/انرژی خورشیدی برای مقابله با پساب رنگی بوده است. شکل ۱۳ (a) عملکرد تجزیه پیزوکاتالیزوری نوری محلول ماده رنگزا را توسط نانوالیاف پوسته-هسته  $\text{ZnO}@/\text{TiO}_2$  نشان می‌دهد. شدت پیک ماده رنگزا در ۴۶۴ نانومتر با گذشت زمان به شدت کاهش می‌یابد که این امر نشانگر تخریب ماده رنگزا است. در مطالعه‌ای دیگر که توسط هی<sup>۲</sup> و همکارانش [۳۳] انجام شد، نانو ساختارهای پیزوالکتریک PVDF و اکسیدروی با ریخت تریپتاید (T-)  $\text{ZnO}/\text{PVDF}$  بر روی بستر پارچه‌ای اعمال شد. گایو<sup>۳</sup> و همکارانش [۳۴] نیز در گزارش دیگری از میدان الکتریکی خارجی حاصل از نانو ساختارهای هیبریدی پوسته-هسته فلزی نیمه‌رسانا، جهت جداسازی بار ناشی از نور استفاده کرده‌اند که به این واسطه بازده تولید هیدروژن کاتالیزوری نوری تا حدود ۱۱۰ درصد بهبود یافته است. همچنین در مطالعه دیگری که توسط Wu<sup>۴</sup> و همکارانش [۳۵] انجام شده است، عملکرد کاتالیزوری نوری به واسطه پلاریزاسیون تولید شده توسط فاز پیزوالکتریک نانوالیاف  $\text{BaTiO}_3/\text{TiO}_2$  تحت امواج فراصوت به طور چشمگیری بهبود یافته است. نرخ اکسیدشدن نانوالیاف بر روی ماده رنگزا  $1/\text{min} \times 10^{-2} \times 9/67$  گزارش شده است که این مقدار به ترتیب ۳/۵۱ و

- <sup>1</sup> You  
<sup>2</sup> He  
<sup>3</sup> Gao  
<sup>4</sup> Ling



شکل ۱۳ (a): طیف UV-Vis محلول ماده رنگزا با نانوالیاف پیزوکاتالیزوری نوری  $\text{ZnO}@/\text{TiO}_2$  در زمان‌های مختلف اعمال ارتعاش و تابش نور، (b) مقایسه بازده تجزیه ماده رنگزا در شرایط مختلف کاتالیزوری [۳۲].

**Figure 13:** UV-Vis spectrum of dye solution with piezophotocatalytic nanofibers  $\text{ZnO}@/\text{TiO}_2$  at different times of vibration and light irradiation, (b) Comparison of dye decomposition efficiency under different catalytic conditions [32].



شکل ۱۴: (a) طرحواره واکنش پیزوکاتالیزوری نوری PZT/TiO<sub>2</sub> در حضور انرژی مکانیکی و انرژی خورشیدی، (b) نمودار ساختار نواری در سطح مشترک محلول [۳۶].

Figure 14: a) Schematic of the PZT/TiO<sub>2</sub> piezophotocatalyst reaction in the presence of mechanical energy and solar energy; (b) Diagram of the band structure at the interface of the solution [36].

جدول ۳: مقایسه کارایی برخی پیزوکاتالیزورهای نوری در حذف ماده رنگزا.

Table 3: Efficiency comparison of different types of piezophotocatalysts in dye removal.

Catalyst Sample	Catalytic Efficiency [%]	Reaction rate [min <sup>-1</sup> ]	Dye	Rate of Dye Degradation [%]	Catalytic conditions	Ref
ZnO nanorods	-	0.01726	AO7	80.8	ultrasonic vibration + UV light	[26]
ZnO nanosheet microspheres	100 45 50	-	MO RhB AO7	70 85 50	ultrasonic vibration + UV light	[27]
BST-PDMS porous foam	275	-	RhB	97.8	ultrasonic vibration + visible light	[28]
ZnO:Sb Thin Films	98.4	0.048	RhB	96	ultrasonic vibration + UV light	[29]
Bi <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (OH)(NO <sub>3</sub> ) Nanosheets	98.8	0.119	MO	99	ultrasonic vibration + visible light	[30]
BaTiO <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub>	-	0.0594	RhB	99.8	ultrasonic vibration + UV light	[31]
ZnO@TiO <sub>2</sub>	90	-	MO	90	ultrasonic vibration + UV light	[32]
T-ZnO/PVDF/fabric	-	-	MB	100	ultrasonic vibration + UV light	[33]
BaTiO <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	-	0.0967	RhB	100	ultrasonic vibration + UV light	[35]
BiOBr	-	0.0714	RhB	100	ultrasonic vibration + visible light	[35]
PZT/TiO <sub>2</sub>	-	0.042	RhB	100	ultrasonic vibration + UV light	[36]
Ag <sub>2</sub> O/tetrapod-ZnO	-	-	MO RhB MB	92.3 99 99	ultrasonic vibration + UV light	[37]
Cl doped ZnO nanorods	48.9	0.0232	RhB	-	ultrasonic vibration + UV light	[38]
bismuth oxychloride nanomaterial(BiOCl)	99	0.03357	RhB	99	ultrasonic vibration + visible light	[39]



## ۵- نتیجه گیری

خاصیت ترکیبی پیژوکاتالیزوری نوری نیز دارد. به عنوان مثال نانوساختارهای ZnO با ریخت‌های مختلف از عملکرد کاتالیزوری نوری، پیژوکاتالیزوری و پیژوکاتالیزوری نوری قابل توجهی در میان سایر ترکیبات برخوردار است. از این رو چنین ترکیباتی پتانسیل بالایی در تخریب مواد رنگزای مختلف و سایر آلاینده‌های آلی از پساب دارند. در حال حاضر عمده تحقیقات صورت گرفته بر روی پیژوکاتالیزوری نوری در زمینه حذف آلاینده‌ها و آب شکافت بوده است که انتظار می‌رود با توجه به خصوصیات بیان شده، در سایر زمینه‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد.

## تشکر و قدردانی

بدینوسیله از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه یزد در اجرای این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

## تعارض منافع

در این مقاله هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

در این مقاله مروری جامع بر روی ویژگی‌های کاتالیزوری نوری و پیژوکاتالیزوری نوری ترکیبات مختلف به منظور حذف آلاینده‌های آلی نظیر ماده رنگزا از پساب صورت گرفت. در ادامه با معرفی خاصیت پیژوکاتالیزوری نوری به بیان مزیت‌ها و عملکرد حذف و تخریب ماده رنگزا از طریق توسعه خاصیت پیژوالکتریک در ترکیبات کاتالیزوری نوری پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد که خاصیت پیژوالکتریک می‌تواند سبب افزایش جداسازی الکترون-حفره‌های ایجاد شده و در نتیجه افزایش کارایی تجزیه کاتالیزوری ماده رنگزا شود. به عبارت دیگر بازیگران اصلی در واکنش‌های پیژوکاتالیزوری نوری رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) و سوپراکسید ( $O_2^-$ ) هستند که با ایجاد بارهای الکتریکی قطبی منجر به تخریب پیژوکاتالیزوری نوری ماده رنگزا و سایر ترکیبات آلی می‌شوند. به طور کلی در حضور پرتو UV و ارتعاش، تجزیه ماده رنگزا برای پیژوکاتالیزورهای نوری امکان پذیر می‌شود. در بین ترکیبات بررسی شده توسط محققان، برخی از آنها تنها دارای یک خاصیت کاتالیزوری نوری یا پیژوکاتالیزوری نوری می‌باشند. اما در برخی موارد ترکیب مدنظر علاوه بر داشتن هر یک از خصوصیات مذکور به طور جداگانه،

## ۶- مراجع

- H. Shahriyari Far, M. Hasanzadeh, M. Nashtaei, M. Rabbani, A. Haji, B. Hadavi Moghadam, "PPI-Dendrimer-Functionalized Magnetic Metal-Organic Framework ( $Fe_3O_4@MOF@PPI$ ) with High Adsorption Capacity for Sustainable Wastewater Treatment", *ACS Appl Mater Interfaces*. 12, 25294–25303, **2020**.
- M. Hasanzadeh, A. Simchi, H.S. Far, Kinetics and adsorptive study of organic dye removal using water-stable nanoscale metal organic frameworks, *Mater. Chem. Phys.* 233 267–275, **2019**.
- M. Hasanzadeh, A. Simchi, H. Shahriyari Far, Nanoporous composites of activated carbon-metal organic frameworks for organic dye adsorption: Synthesis, adsorption mechanism and kinetics studies, *J. Ind. Eng. Chem.* 81, 405–414, **2020**.
- A. Popa, D. Toloman, M. Stan, M. Stefan, T. Radu, G. Vlad, S. Ulinici, G. Baisan, S. Macavei, L. Barbu-Tudoran, O. Pana, Tailoring the RhB removal rate by modifying the PVDF membrane surface through ZnO particles deposition, *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.* 31, 1642–1652, **2021**.
- J. Huang, J. Hu, Y. Shi, G. Zeng, W. Cheng, H. Yu, Y. Gu, L. Shi, K. Yi, Evaluation of self-cleaning and photocatalytic properties of modified g-C 3 N 4 based PVDF membranes driven by visible light, *J. Colloid Interface Sci.* 541, 356–366, **2019**.
- H.M. Lin, K.S. Chang, Synergistic piezophotocatalytic and photoelectrochemical performance of poly(vinylidene fluoride)-ZnSnO<sub>3</sub> and poly(methyl methacrylate)-ZnSnO<sub>3</sub> nanocomposites, *RSC Adv.* 7, 30513–30520, **2017**.
- S. Teixeira, P.M. Martins, S. Lanceros-Méndez, K. Kühn, G. Cuniberti, Reusability of photocatalytic TiO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles immobilized in poly(vinylidene difluoride)-co-trifluoroethylene, *Appl. Surf. Sci.* 384, 497–504, **2016**.
- B. Tang, H. Chen, Y. He, Z. Wang, J. Zhang, J. Wang, Influence from defects of three-dimensional graphene network on photocatalytic performance of composite photocatalyst, *Compos. Sci. Technol.* 150, 54–64, **2017**.
- Y. Liu, D. Zhang, The preparation of reduced graphene oxide-TiO<sub>2</sub> composite materials towards transparent, strain sensing and photodegradation multifunctional films, *Compos. Sci. Technol.* 137, 102–108, **2016**.
- A. Hänninen, E. Sarlin, I. Lyyra, T. Salpavaara, M. Kellomäki, S. Tuukkanen, Nanocellulose and chitosan based films as low cost, green piezoelectric materials, *Carbohydr. Polym.* 202, 418–424, **2018**.
- J. Defebvin, S. Barrau, J. Lyskawa, P. Woisel, J.M. Lefebvre, Influence of nitrodopamine-functionalized barium titanate content on the piezoelectric response of poly(vinylidene fluoride) based polymer-ceramic composites, *Compos. Sci. Technol.* 147, 16–21, **2017**.
- H.J. Ye, W.Z. Shao, L. Zhen, Crystallization kinetics and phase transformation of poly(vinylidene fluoride) films incorporated with functionalized BaTiO<sub>3</sub> nanoparticles, *J. Appl. Polym. Sci.* 129, 2940–2949, **2013**.

- 13.S. Tu, Y. Guo, Y. Zhang, C. Hu, T. Zhang, T. Ma, H. Huang, Piezocatalysis and Piezo-Photocatalysis: Catalysts Classification and Modification Strategy, Reaction Mechanism, and Practical Application, *Adv. Funct. Mater.* 30, 1–31, **2020**.
- 14.L. Pan, S. Sun, Y. Chen, P. Wang, J. Wang, X. Zhang, J.J. Zou, Z.L. Wang, Advances in Piezo-Phototronic Effect Enhanced Photocatalysis and Photoelectrocatalysis, *Adv. Energy Mater.* 10, 1–25, **2020**.
- 15.B.H. Moghadam, M. Hasanzadeh, A. Simchi, Self-Powered Wearable Piezoelectric Sensors Based on Polymer Nanofiber-Metal-Organic Framework Nanoparticle Composites for Arterial Pulse Monitoring, *ACS Appl. Nano Mater.* 3, 8742–8752, **2020**.
- 16.H. Lin, Z. Wu, Y. Jia, W. Li, R.K. Zheng, H. Luo, Piezoelectrically induced mechano-catalytic effect for degradation of dye wastewater through vibrating Pb(Zr<sub>0.52</sub>Ti<sub>0.48</sub>)O<sub>3</sub> fibers, *Appl. Phys. Lett.* 104, 1–5, **2014**.
- 17.L. Chen, Y. Jia, J. Zhao, J. Ma, Z. Wu, G. Yuan, X. Cui, Strong piezocatalysis in barium titanate/carbon hybrid nanocomposites for dye wastewater decomposition, *J. Colloid Interface Sci.* 586, 758–765, **2021**.
- 18.W. Qian, K. Zhao, D. Zhang, C.R. Bowen, Y. Wang, Y. Yang, Piezoelectric Material-Polymer Composite Porous Foam for Efficient Dye Degradation via the Piezo-Catalytic Effect, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 11, 27862–27869, **2019**.
- 19.C. Jin, D. Liu, J. Hu, Y. Wang, Q. Zhang, L. Lv, F. Zhuge, The role of microstructure in piezocatalytic degradation of organic dye pollutants in wastewater, *Nano Energy.* 59, 372–379, **2019**.
- 20.W.T. Yein, Q. Wang, Y. Liu, Y. Li, J. Jian, X. Wu, Piezopotential induced molecular oxygen activation of defect-rich MoS<sub>2</sub> ultrathin nanosheets for organic dye degradation in dark, *J. Environ. Chem. Eng.* 8, 103626, **2020**.
- 21.J. Shi, W. Zeng, Z. Dai, L. Wang, Q. Wang, S. Lin, Y. Xiong, S. Yang, S. Shang, W. Chen, L. Zhao, X. Ding, X. Tao, Y. Chai, Piezocatalytic Foam for Highly Efficient Degradation of Aqueous Organics, *Small Sci.* 1, 2000011, **2021**.
- 22.X. Ning, A. Hao, Y. Cao, J. Hu, J. Xie, D. Jia, Effective promoting piezocatalytic property of zinc oxide for degradation of organic pollutants and insight into piezocatalytic mechanism, *J. Colloid Interface Sci.* 577, 290–299, **2020**.
- 23.G. Singh, M. Sharma, R. Vaish, Exploring the piezocatalytic dye degradation capability of lithium niobate, *Adv. Powder Technol.* 31, 1771–1775, **2020**.
- 24.J. Close, J. Ip, K.H. Lam, Water recycling with PV-powered UV-LED disinfection, *Renew. Energy.* 31, 1657–1664, **2006**.
- 25.Y. Luo, L. Cao, J. Huang, L. Feng, C. Yao, A new approach to preparing Bi<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> photocatalysts for dye degradation, *Mater. Res. Express.* 5, 015039, **2018**.
- 26.J. Ma, J. Ren, Y. Jia, Z. Wu, L. Chen, N.O. Haugen, H. Huang, Y. Liu, High efficiency bi-harvesting light/vibration energy using piezoelectric zinc oxide nanorods for dye decomposition, *Nano Energy.* 62, 376–383, **2019**.
- 27.Y. Bai, J. Zhao, Z. Lv, K. Lu, Enhanced piezocatalytic performance of ZnO nanosheet microspheres by enriching the surface oxygen vacancies, *J. Mater. Sci.* 55, 14112–14124, **2020**.
- 28.S. Xu, W. Qian, D. Zhang, X. Zhao, X. Zhang, C. Li, C.R. Bowen, Y. Yang, A coupled photo-piezo-catalytic effect in a BST-PDMS porous foam for enhanced dye wastewater degradation, *Nano Energy.* 77, 105305, **2020**.
- 29.M. Laurenti, N. Garino, N. Garino, G. Canavese, S. Hernández, V. Cauda, Piezo- And Photocatalytic Activity of Ferroelectric ZnO:Sb Thin Films for the Efficient Degradation of Rhodamine-β dye Pollutant, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 12, 25798–25808, **2020**.
- 30.L. Hao, H. Huang, Y. Guo, Y. Zhang, Multifunctional Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(OH)(NO<sub>3</sub>) Nanosheets with {001} Active Exposing Facets: Efficient Photocatalysis, Dye-Sensitization, and Piezoelectric-Catalysis, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 6, 1848–1862, **2018**.
- 31.Z. Liu, K. Zhao, G. Xing, W. Zheng, Y. Tang, One-step synthesis of unique thorn-like BaTiO<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> composite nanofibers to enhance piezo-photocatalysis performance, *Ceram. Int.* 47, 7278–7284, **2021**.
- 32.H. You, Z. Wu, Y. Jia, X. Xu, Y. Xia, Z. Han, Y. Wang, High-efficiency and mechano-/photo- bi-catalysis of piezoelectric-ZnO@ photoelectric-TiO<sub>2</sub> core-shell nanofibers for dye decomposition, *Chemosphere.* 183 (2017) 528–535, **2017**.
- 33.H. He, Y. Fu, W. Zang, Q. Wang, L. Xing, Y. Zhang, X. Xue, A flexible self-powered T-ZnO/PVDF/fabric electronic-skin with multi-functions of tactile-perception, atmosphere-detection and self-clean, *Nano Energy.* 31, 37–48, **2017**.
- 34.W. Gao, Q. Liu, S. Zhang, Y. Yang, X. Zhang, H. Zhao, W. Qin, W. Zhou, X. Wang, H. Liu, Y. Sang, Electromagnetic induction derived micro-electric potential in metal-semiconductor core-shell hybrid nanostructure enhancing charge separation for high performance photocatalysis, *Nano Energy.* 71, 104624, **2020**.
- 35.J. Wu, W. Wang, Y. Tian, C. Song, H. Qiu, H. Xue, Piezotronic effect boosted photocatalytic performance of heterostructured BaTiO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> nanofibers for degradation of organic pollutants, *Nano Energy.* 77, 105122, **2020**.
- 36.Y. Feng, H. Li, L. Ling, S. Yan, D. Pan, H. Ge, H. Li, Z. Bian, Enhanced Photocatalytic Degradation Performance by Fluid-Induced Piezoelectric Field, *Environ. Sci. Technol.* 52, 7842–7848, **2018**.
- 37.C. Sun, Y. Fu, Q. Wang, L. Xing, B. Liu, X. Xue, Ultrafast piezo-photocatalytic degradation of organic pollutions by Ag<sub>2</sub>O/tetrapod-ZnO nanostructures under ultrasonic/UV exposure, *RSC Adv.* 6, 87446–87453, **2016**.
- 38.J. Yuan, X. Huang, L. Zhang, F. Gao, R. Lei, C. Jiang, W. Feng, P. Liu, Tuning piezoelectric field for optimizing the coupling effect of piezo-photocatalysis, *Appl. Catal. B Environ.* 278, 119291, **2020**.
- 39.M. Ismail, Z. Wu, L. Zhang, J. Ma, Y. Jia, Y. Hu, Y. Wang, High-efficient synergy of piezocatalysis and photocatalysis in bismuth oxychloride nanomaterial for dye decomposition, *Chemosphere.* 228, 212–218, **2019**.

**How to cite this article:**

B. Hadavi Moghadam, M. Hasanzadeh, Enhancing Photocatalytic Activity by Piezoelectric Effect in Dye Removal from Wastewater, *J. Stud. Color world*, 12, 2(2022), 117-131.

DOR: 20.1001.1.22517278.1401.12.2.2.9