**بررسی تأثیر آنیون نیترات بر عملکرد راکتور فتوکاتالیستی آبشاری در حذف فنل**

حذف فنل از فاضلاب‌های صنعتی، به‌ویژه پساب صنایع پتروشیمی، به دلیل سمیت بالای آن، اهمیت زیست‌محیطی قابل توجهی دارد. فرآیندهای فتوکاتالیستی، روش‌های امیدوارکننده‌ای برای تجزیه این آلاینده‌ها هستند، اما عملکرد آن‌ها ممکن است تحت تأثیر یون‌های موجود در فاضلاب قرار گیرد. هدف اصلی این مقاله، بررسی تجربی تأثیر حضور آنیون نیترات (NO3-) بر کارایی یک راکتور فتوکاتالیستی آبشاری با نوردهی از پشت در حذف فنل می‌باشد. برای این منظور، عملکرد راکتور در شرایط بهینه عملیاتی (غلظت اولیه فنل 50 میلی‌گرم بر لیتر، pH برابر با 9 و غلظت فتوکاتالیست TiO2 برابر با 100 گرم بر متر مربع) و در حضور غلظت‌های آنیون نیترات، مشابه آنچه در فاضلاب صنایع پتروشیمی یافت می‌شود (تا 30 میلی‌گرم بر لیتر)، مورد ارزیابی قرار گرفت. از تحلیل آماری واریانس (ANOVA) دوطرفه برای سنجش معنی‌داری اثر نیترات و زمان تصفیه بر بازده حذف فنل استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در محدوده غلظت مورد مطالعه، حضور آنیون نیترات تأثیر آماری معنی‌داری بر عملکرد راکتور فتوکاتالیستی آبشاری در تجزیه فنل ندارد. بازده حذف فنل در حضور و غیاب نیترات (تا غلظت 30 میلی‌گرم بر لیتر) تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشت. این یافته‌ها حائز اهمیت است زیرا نشان می‌دهد که راکتور فتوکاتالیستی آبشاری توسعه‌یافته، پتانسیل کاربرد در تصفیه فاضلاب‌های واقعی صنایع پتروشیمی را داراست و عملکرد آن در حذف فنل، با وجود یون نیترات در غلظت‌های متداول، دچار اختلال نمی‌شود. این امر، گامی مهم در جهت کاربردی‌سازی این فناوری برای تصفیه پساب‌های پیچیده صنعتی است.

**کلمات کلیدی :** فنل، تجزیه فتوکاتالیستی، دی‌اکسید تیتانیوم (TiO2)، راکتور فتوکاتالیستی آبشاری، نوردهی از پشت، آنیون نیترات، پساب پتروشیمی، فاضلاب صنعتی، فاضلاب کدر، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته

**مقدمه**

رشد سریع صنایع و توسعه فعالیت‌های صنعتی در دهه‌های اخیر، ضمن ایجاد رفاه و پیشرفت برای جوامع بشری، منجر به تولید حجم فزاینده‌ای از فاضلاب‌های صنعتی گردیده است که تخلیه آن‌ها به محیط زیست، چالش‌های زیست‌محیطی و بهداشتی فراوانی را به همراه داشته است [Gold, 2011]. یکی از مهم‌ترین گروه‌های آلاینده‌های صنعتی، ترکیبات فنلی هستند که به دلیل کاربرد گسترده در صنایع مختلف از جمله پتروشیمی، پالایشگاه‌ها، تولید رزین، داروسازی، صنایع شیمیایی، کاغذسازی و تولید آفت‌کش‌ها، به یکی از آلاینده‌های رایج در پساب‌های صنعتی تبدیل شده‌اند [Rathoure, 2015; ASTDR, 2016]. فنل و مشتقات آن حتی در غلظت‌های پایین نیز به عنوان مواد سمی و خطرناک شناخته می‌شوند و می‌توانند اثرات نامطلوبی بر سلامت انسان و اکوسیستم‌های آبی داشته باشند [Villegas et al., 2016; Berardinelli et al., 2008]. سمیت بالای فنل و مقاومت آن در برابر تجزیه بیولوژیکی طبیعی، ضرورت تصفیه فاضلاب‌های حاوی این ترکیبات پیش از تخلیه به محیط زیست را دوچندان می‌سازد [Mahmoodi et al., 2007]. به همین دلیل، آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (EPA) و سایر نهادهای نظارتی، استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای برای حداکثر غلظت مجاز فنل در پساب‌های تخلیه‌شده به منابع آبی تعیین کرده‌اند [Rathoure, 2015].

روش‌های متعددی برای حذف فنل از فاضلاب‌های صنعتی توسعه یافته‌اند که می‌توان آن‌ها را به دسته‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تقسیم‌بندی کرد. روش‌های فیزیکی مانند جذب سطحی با کربن فعال یا جداسازی غشایی، اگرچه می‌توانند مؤثر باشند، اما اغلب با مشکلاتی نظیر هزینه بالا، نیاز به احیای جاذب یا گرفتگی غشا مواجه هستند و آلاینده را تنها از فازی به فاز دیگر منتقل می‌کنند [Villegas et al., 2016; Lee and Park, 2013]. روش‌های بیولوژیکی، علی‌رغم هزینه کمتر، برای تجزیه ترکیبات مقاوم و سمی مانند فنل در غلظت‌های بالا کارایی محدودی دارند و ممکن است نیازمند زمان ماند طولانی باشند [Hussain et al., 2015; Pradeep et al., 2015]. روش‌های اکسیداسیون شیمیایی مانند استفاده از ازن یا کلر نیز می‌توانند مؤثر باشند، اما ممکن است منجر به تولید محصولات جانبی سمی و خطرناک شوند و نیازمند افزودن مواد شیمیایی به پساب هستند [Peings et al., 2015].

در سال‌های اخیر، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) به عنوان روش‌های نوین و کارآمد برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی ترکیبات آلی مقاوم و سمی، مورد توجه فراوانی قرار گرفته‌اند [Wang and Xu, 2012]. در میان AOPs، فرآیند فتوکاتالیز ناهمگن (Heterogeneous Photocatalysis) با استفاده از نیمه‌رساناها، به ویژه دی‌اکسید تیتانیوم (TiO2)، به دلیل مزایایی چون کارایی بالا در تجزیه طیف وسیعی از آلاینده‌ها، قابلیت معدنی‌سازی کامل آلاینده‌ها به آب و دی‌اکسید کربن، عدم تولید لجن و مواد جانبی مضر، هزینه نسبتاً پایین و امکان استفاده از نور خورشید یا تابش فرابنفش (UV) به عنوان منبع انرژی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [Ahmed et al., 2010; Bhatkhande et al., 2002]. اساس این فرآیند، فعال‌سازی نیمه‌رسانای فتوکاتالیست (مانند TiO2) تحت تابش نور با انرژی کافی (معمولاً UV) است که منجر به ایجاد زوج الکترون-حفره می‌شود. این زوج‌های بار، با مولکول‌های آب و اکسیژن واکنش داده و رادیکال‌های بسیار فعال هیدروکسیل (•OH) و سایر گونه‌های اکسیژن فعال را تولید می‌کنند که قدرت اکسیدکنندگی بالایی داشته و می‌توانند مولکول‌های آلی آلاینده را به ترکیبات ساده‌تر و بی‌ضرر تجزیه کنند [Virkutyte et al., 2010; Barakat and Kumar, 2016]. <مزیت اصلی این روش‌ها، توانایی آن‌ها در معدنی‌سازی کامل آلاینده‌های آلی است که بسیاری از روش‌های دیگر قادر به انجام آن نیستند [Malato et al., 2009]>. نانوذرات TiO2 به دلیل سطح ویژه بالا، پایداری شیمیایی و بیولوژیکی، غیرسمی بودن، هزینه پایین و فعالیت فتوکاتالیستی بالا، به عنوان پرکاربردترین فتوکاتالیست در تصفیه آب و فاضلاب شناخته می‌شوند [Gaya and Abdullah, 2008].

با وجود مزایای فراوان، کاربرد عملی فرآیندهای فتوکاتالیستی، به‌ویژه در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی واقعی، با چالش‌هایی روبرو است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، وجود کدورت بالا در بسیاری از فاضلاب‌های صنعتی، مانند فاضلاب صنایع پتروشیمی است [Giwa et al., 2013]. کدورت ناشی از ذرات معلق، باعث پراکندگی و جذب نور UV شده و از رسیدن کافی نور به سطح فتوکاتالیست جلوگیری می‌کند که این امر منجر به کاهش شدید بازده فرآیند می‌شود [Chong et al., 2010; Royaee et al., 2012]. این مشکل به‌ویژه در راکتورهای فتوکاتالیستی با بستر ثابت (که فتوکاتالیست بر روی سطحی تثبیت شده است) حادتر است، زیرا در این سیستم‌ها منبع نور و فاضلاب معمولاً در یک سمت بستر قرار دارند [Lasa De et al., 2005]. در راکتورهای با بستر معلق (دوغابی) نیز اگرچه تماس بهتر بین فتوکاتالیست و آلاینده وجود دارد، اما مشکل جداسازی نانوذرات فتوکاتالیست پس از تصفیه و همچنین پدیده سایه‌اندازی ذرات بر روی یکدیگر، هزینه فرآیند را افزایش می‌دهد [Shan et al., 2010; Dougna et al., 2015].

برای غلبه بر مشکل کدورت، در این پژوهش یک ساختار نوآورانه برای راکتور فتوکاتالیستی آبشاری با نوردهی از پشت (backlight cascade photocatalytic reactor) طراحی و توسعه داده شده است. در این راکتور، فتوکاتالیست TiO2 بر روی یک سطح شفاف (پلکسی گلاس) تثبیت شده و منبع نور UV در زیر این سطح قرار می‌گیرد. فاضلاب کدر از روی سطح پوشش داده شده عبور می‌کند. این پیکربندی باعث می‌شود که نور UV بدون مانع ناشی از کدورت فاضلاب، مستقیماً به فتوکاتالیست برسد و در عین حال، مشکل جداسازی فتوکاتالیست نیز وجود نداشته باشد [Khaksar, 2020 - اشاره به یافته‌های کلی رساله]. این طراحی نوآورانه، پتانسیل افزایش کارایی تصفیه فتوکاتالیستی فاضلاب‌های کدر را داراست.

علاوه بر کدورت، فاضلاب‌های صنعتی واقعی معمولاً حاوی ترکیبات معدنی و یون‌های مختلفی هستند که می‌توانند بر عملکرد فرآیند فتوکاتالیستی تأثیر بگذارند. <برخی یون‌ها ممکن است به عنوان تسریع‌کننده و برخی دیگر به عنوان بازدارنده عمل کنند یا با رادیکال‌های هیدروکسیل واکنش داده و بازده فرآیند را کاهش دهند [Herrmann, 1999]>. فاضلاب صنایع پتروشیمی، علاوه بر فنل و کدورت، غالباً حاوی آنیون نیترات (NO3-) است [Giwa et al., 2013]. نیترات می‌تواند با جذب فوتون‌های UV یا واکنش با الکترون‌های باند هدایت، بر فرآیند تأثیر بگذارد. بنابراین، بررسی تأثیر حضور آنیون نیترات در محدوده غلظت‌های موجود در فاضلاب پتروشیمی بر عملکرد راکتور پیشنهادی، برای ارزیابی کاربردپذیری عملی آن ضروری است.

با توجه به موارد ذکر شده، اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از:

1. طراحی و ساخت راکتور فتوکاتالیستی آبشاری با نوردهی از پشت برای تصفیه فاضلاب کدر حاوی فنل.

2. بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی کلیدی شامل غلظت اولیه فنل، غلظت TiO2، pH، زمان تصفیه و کدورت بر بازده حذف فنل در راکتور پیشنهادی.

3. تعیین شرایط بهینه عملکرد راکتور برای دستیابی به حداکثر بازده حذف فنل.

4. بررسی تأثیر حضور آنیون نیترات در محدوده غلظت‌های واقعی فاضلاب پتروشیمی بر بازده حذف فنل در شرایط بهینه عملکرد راکتور.

این پژوهش در نظر دارد تا با ارائه یک راهکار عملی و ارزیابی جامع عملکرد آن در شرایط نزدیک به واقعیت، گامی در جهت توسعه کاربرد فرآیندهای فتوکاتالیستی برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی پیچیده و کدر بردارد.