

## کاربرد آنزیم‌ها در تصفیه فاضلاب

آزاده خیرالعموم\*

### چکیده

استفاده از آنزیم‌ها به عنوان یک روش نوین در تصفیه فاضلاب، هنگامی که هدف کاهش غلظت آلاینده مورد نظر به حدود غلظت‌های مورد قبول باشد، باعث تحولی در فرایندهای متداول تصفیه می‌شود. این کاتالیست‌های طبیعی به دلیل دارا بودن برخی ویژگیهای جذاب از جمله بسیار انتخابی عمل کردن، غیر سمی بودن و دارا بودن قابلیت تجزیه بیولوژیکی، جایگاه ویژه‌ای را در فرایندهای تصفیه فاضلاب به خود اختصاص داده‌اند. از آنجایی که تاکنون بیشتر تحقیقات انجام شده صرفاً بر روی حذف آلاینده‌ها متمرکز می‌باشد، به منظور توسعه فن‌آوری کاربرد آنزیم‌ها در این فرایندها می‌بایست مسائل فنی که نهایتاً امکان‌پذیری فرایند را توجیه می‌نماید نیز مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله از یک سو موارد کاربرد آنزیم‌ها و شناسایی آنزیم‌های مناسب بررسی و از سوی دیگر مسائل ضروری جهت توسعه فن‌آوری آنزیم‌ها تعریف و مورد بحث قرار می‌گیرند.

### مقدمه

گرچه ضرورت انجام فرایندهای تصفیه فاضلاب تاکنون، توسط شاخص‌هایی همچون COD، BOD، TOC<sup>۱</sup> مطرح شده‌اند، اما امروزه تأکید زیادی بر کاهش آلودگی از مخلوط پسماند و همچنین اثرات فرایندهای تصفیه بر روی محیط‌های متنوع (آب، خاک و هوا) می‌شود. بدین ترتیب تصمیم بر روی انتخاب فرایند تصفیه فاضلاب نیازمند ارزیابی فاکتورهایی چون توجیه فنی و اقتصادی و همچنین توانایی تولید باقیمانده‌هایی که قابلیت دفع یا تصفیه مجدد را داشته باشند، می‌شود.

برای فاضلابهایی که ترکیبات سمی دارند، فرایندهای

برای کاهش بار آلی در فاضلابهای صنعتی و شهری استفاده می‌شوند. لیکن این فرایندها غالباً در کاهش آلاینده‌های سمی به حدود غلظتهای پایین با مشکل مواجه می‌شوند. لذا فرایندهای متداول بیولوژیکی ممکن است به عنوان یک فرایند تصفیه در رسیدن به استانداردهای برخی از ترکیبات خاص قابل استفاده نباشد. از طرفی فرایندهای بیولوژیکی ممکن است نسبت به بازدارندگی یک یا چند ترکیب در فاضلاب حساس باشند.

در سالهای اخیر فرایندهای تصفیه فیزیکی و شیمیایی پیشرفته از قبیل جذب سطحی به وسیله کربن فعال و فرایندهای مختلف اکسیداسیون قادرند آلودگی‌های آلی را تا حدود غلظتهای پایین کاهش دهند، لیکن بیشتر فرایندهای تصفیه فیزیکی و شیمیایی برای حذف گروهی از آلاینده‌ها قادر نیستند به طور انتخابی عمل نمایند. در نتیجه چنین فرایندهایی برای فاضلابهای رقیق اقتصادی‌ترند و اغلب به عنوان یک مرحله تکمیلی<sup>۱</sup> به کار می‌روند. به عنوان مثال در روش اکسیداسیون شیمیایی، هنگامی که فاضلاب دارای قدرت آلاینده‌های بالایی باشد یا زمانی که لازم است میزان آلاینده‌ها به حدود غلظت پایینی برسد، باید میزان ماده اکسیدکننده افزایش یابد که در نتیجه افزایش هزینه به وجود خواهد آمد.

هنگامی که هدف اصلی تصفیه، کاهش پارامترهای کلی چون COD باشد، حذف انتخابی ترکیبات سمی اهمیتی نخواهد داشت. روش انتخابی می‌تواند برای حذف مواد شیمیایی خاص برای حصول معیارهای قانونی و یا تسهیل تصفیه‌های بعدی، بسیار مهم باشد. بسیاری از فاضلابهای صنعتی، حاوی عوامل بازدارنده یا ترکیبات شیمیایی سمی به همراه ترکیبات آلی (غیر سمی) است که اگر این عوامل بازدارنده یا آلاینده‌های سمی بتوانند به طور انتخابی حذف شوند، قسمت عمده مواد آلی موجود در فاضلاب توسط فرایندهای بیولوژیکی قابل تصفیه شده و در نتیجه هزینه تصفیه به حداقل مقدار خود خواهد رسید.

بدین ترتیب ضرورت استفاده از آنزیم‌ها به منظور جداسازی انتخابی آلاینده‌ها در تصفیه فاضلاب نمایان می‌شود.

استفاده از آنزیم‌ها در تصفیه فاضلاب اولین بار در دهه

۱۹۳۰ میلادی مطرح گردید هر چند ایده استفاده از آنزیم‌ها به

منظور حذف یکایک آلاینده‌ها در مخلوطهای فاضلاب تادهه ۱۹۷۰ میلادی به وجود نیامده بود. نقش آنزیم‌ها، ایجاد تغییرات بیوشیمیایی در مواد می‌باشد. این کاتالیست‌های طبیعی بسیار سریعتر از تمامی کاتالیست‌های شیمیایی شناخته شده عمل می‌کنند، به طوری که سبب افزایش سرعت واکنش تا فاکتور<sup>۱۵</sup> - ۱۰<sup>۱۲</sup> می‌گردند. همانند سایر کاتالیست‌ها سبب انجام و تسریع واکنشهای شیمیایی شده و نهایتاً در پایان واکنش، مصرف نشده باقی می‌مانند. آنزیم‌ها به طور کلی به دو صورت توسط سلولها تولید می‌شوند: آنزیم‌هایی که سلول به دلیل عملکرد ویژه آنزیم به خارج آزاد می‌نماید، آنزیم‌های برون سلولی<sup>۲</sup> و آنزیم‌هایی که سلول در داخل تولید می‌نماید، آنزیم‌های درون سلولی<sup>۳</sup> هستند. آنزیم‌ها دارای ویژگیهای جالبی چون به شدت انتخابی عمل کردن، غیر سمی بودن، قابلیت تجزیه بیولوژیکی داشتن و انجام واکنش در شرایط فیزیکی متعدد می‌باشند. در مقابل، معایب آنزیم‌ها از قبیل حساسیت در برابر حرارت و اسیدیته محیط و بازدارندگی آنها به وسیله واکنش‌گرهای شیمیایی قابل ذکر می‌باشند. آنزیم‌ها از نظر ساختمانی یا تماماً از اسیدهای آمینه و یا از اسیدهای آمینه به همراه فاکتورهای غیر پروتئینی مثل یونهای فلزی و یا یک ملکول آلی تشکیل شده‌اند. از جمله روشهای مقابله با یکی از مهمترین معایب آنزیم‌ها یعنی ناپایداری آنها، تثبیت کردن<sup>۴</sup> آنها بر روی حاملهای مناسب و یا استفاده از مهندسی ژنتیک در تولید آنزیم‌های پایدارتر، فعالتز و ارزان قیمت‌تر قابل ذکر می‌باشد. بسیار اختصاصی عمل کردن آنزیم‌ها نسبت به سوبستراشان دهنده حذف انتخابی آلاینده‌های مورد نظر می‌باشد، در حالی که در غیر این صورت، نیاز به مقدار زیادی از واکنش‌گرهای شیمیایی دارند. به عبارت دیگر خاصیت اختصاصی بودن آنزیم‌ها از انجام واکنش‌های غیر ضروری جلوگیری می‌کند که خود نسبت به سایر فرایندهای رایج تصفیه شیمیایی منفعت بسیار زیادی دارد زیرا از مصرف واکنش‌گر

- 1- Polishing Step
- 2- Extracellular
- 3- Intracellular
- 4- Immobilization

\* - استادیار دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی شریف

1- Total Organic Carbon

شیمیایی و متعاقباً از افزایش هزینه جلوگیری می‌کند. بنابراین آنزیم‌ها هم ویژگی انتخابی بودن، هم خاصیت سادگی، هم قابلیت اطمینان و توانایی پیش‌گویی سیستم‌های تصفیه متداول شیمیایی را دارند.

این مقاله شرایط استفاده از آنزیم‌ها در تصفیه فاضلاب را بررسی نموده و به دنبال آن به مسائل مربوط به توسعه فن آوری آنزیم‌ها به عنوان یک فرایند تصفیه قابل رشد و ترقی، با در نظر گرفتن موانع اقتصادی و فنی جهت توسعه می‌پردازد.

## کاربردها

تصفیه آنزیمی مانند دیگر فرایندهای تصفیه فاضلاب، ممکن است فقط برای برخی موارد مناسب باشد. از جمله کاربردهای مناسب آنزیم‌ها به شرح زیر می‌باشد:

۱- حذف ترکیبات شیمیایی خاص از یک مخلوط فاضلاب صنعتی قبل از انجام یک تصفیه بیولوژیکی، که در واقع آنچه مورد نظر است کاهش میزان بازدارندگی فاضلاب یا میزان سمّیت در جریان خروجی است. برخی از فاضلاب‌ها به علت داشتن مواد سمّی یا دیگر ترکیبات خطرناک از نظر قانونی به عنوان ضایعات خطرناک شناخته می‌شوند. برای چنین فاضلابهایی ترکیبات سمّی می‌توانند در طول تصفیه بیولوژیکی همراه لجن جداگردند. در این صورت لجن مازاد تولیدی به عنوان یک باقیمانده خطرناک با هزینه دفع زیاد محسوب می‌شود. حال اگر مواد سمّی بتوانند به صورت انتخابی قبل از تصفیه بیولوژیکی جدا شوند، لجن مازاد به عنوان یک باقیمانده غیر خطرناک از قوانین ضایعات خطرناک معاف می‌گردد.

۲- حذف ترکیبات شیمیایی خاص از مخلوط‌های رقیق، هنگامی که فرایندهای تصفیه بیولوژیکی (توده میکروبی) متداول قادر به حذف آن نباشد. برای مثال آبهای سطحی آلوده غالباً بر روی سطح زمین تصفیه<sup>۱</sup> می‌شوند.

۳- آنزیم‌ها می‌توانند در مرحله تکمیلی فاضلاب تصفیه شده شهری یا صنعتی و یا در مورد آبهای سطحی برای حصول به محدودیت‌های آلاینده‌های خاص به کار روند.

۴- تصفیه فاضلابهایی که به صورت مقطعی و یا در مکانهای متروکه تولید می‌شوند (شامل مکانهای دور ریز و یا

مکانهای متروکه دفع فاضلاب).

۵- تصفیه در داخل کارخانه<sup>۲</sup> برای فاضلابهای با غلظت زیاد و حجم کم. در عمل این نوع تصفیه ممکن است امکان استفاده مجدد فاضلاب تصفیه شده را فراهم سازد و یا بازیابی محصولات محلول را آسان نماید و یا نهایتاً سبب حذف آلاینده‌هایی گردد که به هنگام اختلاط با سایر فاضلابهای کارخانه در جریان پایین دستی<sup>۳</sup> ایجاد مشکل می‌نماید.

البته مواردی دیده می‌شود که تصفیه آنزیمی مناسب به نظر نمی‌رسد. به عنوان مثال فرایندهای تصفیه بیولوژیکی رایج برای تصفیه مواد آلی در مخلوط‌های آبی با غلظتهای متوسط به بالا (در صورتی که از نظر فنی امکان‌پذیر باشد) از روشهای مقرون به صرفه می‌باشد. اگر یک مرحله تکمیلی مثل جذب سطحی به وسیله کربن فعال پس از یک تصفیه آنزیمی برای دستیابی به معیارهای قانونی ضروری باشد، فرایند آنزیمی احتمالاً دیگر از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نخواهد بود. برای مثال فاضلابهایی که حاوی انواع بسیار زیاد مواد شیمیایی می‌باشند برای تصفیه آنها لازم است از انواع مختلف آنزیم استفاده شود.

۴- راکتورهای مورد استفاده برای فرایندهای آنزیمی بایستی نسبتاً ساده باشند. اگر قیمت آنزیم به حد کافی پایین باشد به طوری که دفع آنزیم بعد از یک مدت زمان اقامت میسر باشد (به عبارتی یکبار مصرف باشد)، می‌توان از راکتورهای مخلوط کننده رایج که به طور منقطع، نیمه پیوسته و یا پیوسته که دارای ساده‌ترین اشکال راکتور می‌باشند استفاده کرد. بیشتر کاربردهای تجاری آنزیم‌ها امروزه به صورت یکبار مصرف هستند. اما راکتورهای مخلوط کننده می‌توانند با یک فرایند بازیابی غشایی به منظور بازگرداندن آنزیم جهت استفاده مجدد همراه شوند. به عنوان روش قابل کاربرد دیگر، آنزیم‌های تثبیت شده را می‌توان ذکر نمود. به علت وجود آلاینده‌های میکروبی ناشی از طبیعت غیر استریل فاضلابهای صنعتی و شهری باید از حامل‌های ارزان قیمت استفاده شود تا بتوان پس از یک مدت

- 1- Pump and treat remediation
- 2- In plant treatment
- 3- Down Stream

زمان معین عملیاتی، آن را تعویض نمود. بنابراین انتخاب یک نوع راکتور خاص برای کاربردهای ویژه می‌باید تنها پس از تجزیه و تحلیل اقتصادی انجام گیرد که برای آن تجزیه و تحلیل سینتیک و کنش نقش مهمی را بازی می‌کند.

۵- آنزیم بایستی تحت شرایط واکنش، نسبتاً پایدار باشد. کاهش فعالیت آنزیم یا به عبارتی غیرفعال شدن آنزیم می‌تواند متأثر از چندین راهکار باشد که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد. به منظور استفاده حداکثر از عمر مفید یک آنزیم می‌باید هر یک از راهکارهای فوق در طی طراحی راکتور در نظر گرفته شود. واضح است که سرعت غیرفعال شدن آنزیم تأثیر زیادی بر اقتصاد فرایند دارد.

۶- آنزیم مورد نظر باید اقتصادی بوده و از نظر تجاری در دسترس باشد. این مورد باید که به عنوان یک معیار کلیدی در نظر گرفته شود.

## آنزیم‌های پیشنهادی

توسعه هرگونه کاربرد تجاری آنزیم‌ها چیزی فراتر از یک توجیه تکنیکی را می‌طلبد. به طور واضح، هزینه یک پارامتر مهم می‌باشد به طوری که بعضی از آنزیم‌ها تنها به علت مقدار هزینه مصرفی، توسعه و پیشرفتشان حتی با وجود خصوصیات خاصی که دارند غیر ممکن گشته است. به عنوان مثال آنزیم‌هایی که احتیاج به کوفاکتورهایی چون ATP، ADP، NAD، NADP و یا گونه‌های احیاء شده آنها، NADH، NADPH دارند نمی‌توانند انتخاب مفیدی برای کاربردهای تجاری باشند مگر این که مسائل اقتصادی حفظ و احیاء این کوفاکتورها بر طرف شوند. امروزه آنزیم‌هایی که بیشتر در صنعت استفاده می‌شوند، آنزیم‌های برون سلولی هستند که نسبت به آنزیم‌های درون سلولی نیاز کمتری به فرایندهای تکمیلی جهت رسیدن به شکل قابل عرضه در بازار دارند.

البته طیف وسیعی از آنزیم‌های میکروبی وجود دارند که جهت کاتالیز کردن تغییر و تبدیل آلاینده‌ها شناخته شده‌اند. لیکن به علت محدودیت‌هایی که قبلاً ذکر شد، غالب این آنزیم‌ها در توسعه تجاری فرایندهای تصفیه فاضلاب استفاده نمی‌شوند. آنزیم‌هایی که به علت پتانسیل کاربرد در فرایندهای

تصفیه فاضلاب به طور ویژه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند در جدول ۱ درج شده است.

غالب آنزیم‌های مطالعه شده به ویژه به دلیل کاربردها در تصفیه فاضلاب عبارتند از: Organophosphate pesticide hydrolases و آنزیم‌های اکسیدکننده فنل‌ها (مانند Laccase، Peroxidases، Polyphenol Oxidase) می‌باشند. نکته قابل توجه این است که کارهای کمی بر روی آنزیم‌های تجاری در زمینه کاربرد آنها در تصفیه فاضلاب صورت گرفته است به عنوان نمونه پروتئازها و آنزیم‌های تبدیل‌کننده نشاسته قابل ذکر می‌باشند. چنین آنزیم‌هایی ممکن است کاربردهایی در افزایش قابلیت تصفیه بیولوژیکی فاضلابهای حاصل از صنایع غذایی و یا برای تبدیل کردن مواد جامد (مثل لجن‌ها) به ترکیبات آلی محلول و قابل تجزیه داشته باشند. در مطالعاتی که بر روی اثرات لیزوزیم و سه پروتئاز بر روی محلول کردن مواد جامد لجن حاصل از واحدهای تصفیه شهری انجام شده، تنها تریپسین قادر به محلول نمودن جامدات شناخته شده است.

## معیارهای کاربردی تصفیه آنزیمی

بیشتر مواردی که تا به امروز در باره آنزیم‌ها جهت تبدیلات آنزیمی آلاینده‌ها یا به عبارت دیگر بر روی حذف آلاینده‌ها از محلول متمرکز شده است نتیجه مشاهدات در داخل لوله آزمایش<sup>۱</sup> می‌باشد. به غیر از حذف ترکیبات مورد نظر، تحقیقات اندکی در مورد مسائل طراحی فرایند و یا بر روی معیارهای اجرایی حذف ترکیبات مورد نظر انجام شده است. به طور واضح مشخص است که در توسعه فن آوری آینده مسائل فنی متعددی باید مورد توجه قرار گیرد. به عنوان مثال برای آن که فرایندهای تصفیه آنزیمی فاضلابها از لحاظ فنی و اقتصادی توجیه‌پذیر شوند، می‌توان به معیارهای زیر دست یافت:

۱- محصولات واکنش در مقایسه با ترکیبات اولیه باید کمتر سمّی باشند و بیشتر قابل تجزیه بیولوژیکی و یا در غیر این صورت بیشتر قابل تصفیه بعدی باشند. از هیچ آنزیمی به تنهایی نمی‌توان انتظار داشت تا تبدیل آلاینده‌ها را به میزان وسیعی

1- in vitro بررسی عملکرد آنزیم پس از استخراج از سلول در محیط‌هایی مقایسه با محیط سلول

کاتالیز نمایند و بدین لحاظ است که محصولات واکنش، بعضی از اشکال شیمیایی و ساختمانی ترکیب مادر را حفظ می نمایند. بنابراین بسیار مهم است که محصولات را بر حسب رفتار آنها در فرایندهای جریان پایین دستی و یا بعد از آزاد شدن آنها به محیط مشخص نمایم. همان طوری که قبلاً نیز بحث شد یکی از مقاصد اساسی استفاده از آنزیم‌ها سمیت زدایی آلاینده‌ها است، گرچه سمیت محصول، تنها در موارد کمی مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی که در بعضی موارد تبدیلات آنزیمی یک آلاینده ممکن است واقعاً سبب افزایش در سمیت آن شود، بنابراین برای هر آنزیمی که برای استفاده در تصفیه فاضلاب پیشنهاد می شود باید این اثرات را بررسی نمود.

۲- برای بیشتر کاربردهای بحث شده یک فرض کلیدی آن است که آنزیم به طور انتخابی بر روی ترکیب مورد نظر عمل می کند. بنابراین چنین ویژگیهایی می باید در طی تحقیقات مقدماتی آزمایشگاهی تأیید شود.

۳- آنزیم می باید یک میزان معقول از فعالیت ذاتیش را تحت شرایط ویژه تصفیه نشان دهد. ترکیب و حجم فاضلاب در زمانهای کوتاه می تواند تغییر قابل ملاحظه‌ای کند و همچنین انواع مواد تشکیل دهنده نامطلوب همانند بازدارنده‌های آنزیمی ممکن است در فاضلاب وجود داشته باشد. از طرفی pH و دمای فاضلاب ممکن است تماماً خارج از دامنه بهینه آنزیم باشند. به علاوه بیشتر فاضلابهای شهری و صنعتی آلوده هستند و بنابراین احتمال تجزیه میکروبی آنزیم باید پیش بینی شود. اندازه گیریهایی که عموماً برای کنترل شرایط واکنش در تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی (میزان جریان، ترکیب فاضلاب و کنترل pH) استفاده می شوند، در فرایندهای تصفیه آنزیمی به کنترل دقیق تری نیاز دارند.

### غیرفعال شدن آنزیم‌ها

به همراه دیگر کاربردهای تجاری آنزیم‌ها، مسئله غیرفعال شدن آنزیم یک فاکتور مهم در تشخیص امکان استفاده از آنزیم‌ها در تصفیه فاضلاب خواهد بود. کاهش فعالیت آنزیم‌ها می تواند ناشی از چندین اثر یا راهکار باشد. لذا برای هر مورد خاص نیاز به تمیز دادن بین این راهکارها می باشد زیرا

برخی از این راهکارها به آسانی قابل کنترل می باشند.

### ۱- عدم پایداری حرارتی

تمام پروتئین‌ها در محلول‌های آبی، به پدیده غیر فعال شدن بسیار حساس می باشند. چنین پدیده‌ای می تواند منجر به از بین رفتن برگشت پذیر و یا غیربرگشت پذیر فعالیت آنزیمی شود. لیکن عدم پایداری حرارتی ساده ترین راهکار قابل کنترل می باشد. برای مثال پایداری حرارتی را به آسانی می توان با افزایش غلظت آنزیم و یا با اضافه نمودن موادی با وزن ملکول بالا مثل سرم آلبومین، ژلاتین، پلی الکترولیت‌ها و یا پلی اتیلن گلیکول افزایش داد. آنزیم‌ها در حلالهای آلی در مقایسه با محیطهای آبی پایداری گزارش شده اند. برخی از آنزیم‌های مندرج در جدول ۱ مثل Laccase, Polyphenol oxidase در Horseradish Peroxidases حلالهای آلی مطالعه شده اند. تثبیت آنزیم‌ها نیز همچنین یک روش شناخته شده برای افزایش پایداری حرارتی می باشد.

### ۲- از دست دادن گروه پروستتیک

برای آنزیم‌هایی که حاوی گروه پروستتیک با پیوندهای غیر کووالانت می باشند (مثل آنزیم‌های حاوی heme)، از دست دادن گروه پروستتیک منجر به غیرفعال شدن آنزیم می شود. جدایی heme از پروتئین‌های حاوی heme از آنجایی که تابعی از pH گزارش شده است، کنترل pH مناسب می تواند ساده ترین روش در حداقل رسانی این پدیده باشد.

### ۳- انتقال فاز

در طی اکسیداسیون توسط Horseradish Peroxidases مشاهده گردید که آنزیم به محصول پلی مری اکسیداسیون جذب گردیده و لذا بخشی از آنزیم قابلیت دسترسی به سوبسترای محلول خود را از دست می دهد. لذا جدایی و جذب آنزیم توسط محصولات غیر محلول واکنش که منجر به تشکیل رسوب می شود می باید در تمامی موارد کاربرد آنزیم‌ها بررسی شود.

جدول ۱- قابلیت کاربرد آنزیم‌ها در تصفیه فاضلاب

آنزیم	آلودگی (ها) یا جریان فاضلاب
Azoreductase	رنگهای آزو
Laccase	برموفنول‌ها کلروفنول‌ها کلرومتیل فنول‌ها هیدروکسی کربنات‌ها متوکسی و متیل فنل‌ها فنل نفتول‌ها فاضلاب کارخانه کتان
Peroxidases	فاضلاب واحد سفیدکننده آروماتیک آمینها کلروفنل‌ها متیل فنل‌ها فنل آروماتیک آمینها
Horseradish Peroxidase	برموفنل‌ها فنل فاضلاب واحد سفیدکننده فاضلاب کارخانه کتان
Lignin Peroxidase	رنگها کلروفنل‌ها هیدروکربنهای آروماتیکی چند حلقه متان اکسی فنل‌ها
Manganese Peroxidase	فاضلاب واحد سفیدکننده
Polyphenol Oxidase	۱- نفتول برموفنل‌ها کلروفنل‌ها فنل فاضلاب واحد سفیدکننده، کارخانه کتون
Cyanidase	سیانید
Cellulase	کارخانه قند
Phosphoesterases	اتیل، دیازینون
( Organophosphate Pesticide hydrolases )	پاراواکسون

#### ۴- غیرفعال شدن بر پایه راهکار

این حالت زمانی اتفاق می افتد که محصول واکنش آنزیمی با آنزیم به نحوی واکنش انجام دهد که باعث غیرفعال شدن غیر برگشتی آن می گردد. از میان آنزیم های ذکر شده در جدول ۱، چنین غیرفعال شدن در مورد آنزیم های اکسیدکننده فنل بسیار مشاهده شده است. تثبیت کردن آنزیم ها اصولاً اثر کمتری بر روی راهکار غیرفعال شدن دارد. لیکن در برخی مطالعات گزارش شده که این عمل باعث افزایش فعالیت آنزیم شده است.

#### ۵- بازدارندگی غیر برگشتی

این بازدارندگی به وسیله پیوند محکم بین یک بازدارنده با جایگاه فعال آنزیم اتفاق می افتد. لذا توصیه می شود که اثرات مخلوط فاضلاب بر روی واکنش های تغییر و تبدیل آنزیمی یک سوسترای به خصوص با تغییر و تبدیل آنزیمی همان سوسترادر یک محلول تمیز مقایسه شود.

#### نتیجه گیری

مدیریت فاضلاب کار تحقیقاتی پیچیده ای است. هنگامی

که تأکید بر روی حذف مواد شیمیایی ویژه و یا کاهش سمیت مطرح می شود، هیچ تکنولوژی تصفیه ای که به خصوص با هدف حداقل رسانی هزینه همراه باشد، در سطح جهانی قابل کاربرد نمی باشد. بنابراین توسعه فن آوری فرایندهای جدید جهت رفع نیازهای فرایند خاص مهم می باشد. در اینجا تکنولوژی آنزیمی نقش مهمی در تصفیه فاضلاب ایفا می نماید. آنزیم ها به دلیل خاصیت عملکرد انتخابی شان کاربرد ویژه ای در امر تصفیه فاضلاب جهت حذف مواد شیمیایی ویژه و یا کاهش سمیت دارند. در اینجا به طور کلی آنزیم هایی که دارای ویژگی وسیع سوسترایی هستند، به دلیل وسعت آلاینده های موجود در فاضلاب ها می توانند بیشتر مناسب امور تصفیه فاضلاب باشند. علیرغم محدودیت نسبی کاربرد تکنولوژی آنزیم ها در تصفیه فاضلاب، مواردی که در آن فرایندهای آنزیمی به ویژه مورد نظر و سودمند می باشند، تشریح گردید. از طرفی مسائل فنی بسیاری را باید پیش از قضاوت بر توجیه اقتصادی مورد مطالعه و بررسی قرار داد تا به دنبال آن بتوان توسعه فرایندهای تجاری آنزیم ها را مد نظر قرار داد.

#### منابع و مراجع

- 1- Antebi, E. and Fishlock, D. ( 1985 ). " *Biotechnology Strategies for Life* ", The MIT Press.
- 2- Scopes, R.K. ( 1982 ). " *Protein Purification Principles and Practice* ", Springer -Verlag, New York.
- 3- Aitken, M. D. ( 1993 ). " *Waste Treatment Applications of Enzymes: Opportunities and Obstacles* ", Chem. Eng. J., 52, B49 - B58.
- 4- Shuler, M. L. and Kargi, F. ( 1992 ). " *Bioprocess Engineering* ", PTR, Prentice Hall, New Jersey.
- 5- Higging, T. ( 1990 ). " *Hazardous Waste Minimization Handbook* ", Lewis Publishers, Inc.
- 6- Moore, J.W. and Moore, E.A. ( 1976 ). " *Environmental Chemistry* ".