

تصفیه آب شور به کمک بیوفیلتر حاوی آنزیم‌های مقاوم به نمک استخراج‌شده از کرم‌های پرتار

متین خالقی

ایران، چابهار، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، گروه زیست‌شناسی دریا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

چکیده

با توجه به افزایش نیاز به منابع جایگزین آب شیرین، تصفیه آب شور به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های زیست‌محیطی جهان تبدیل شده است. رسوب‌گیری زیستی یکی از چالش‌های اساسی سیستم‌های آب‌شیرین‌کن است که منجر به کاهش شار عبوری، افزایش فشار عملیاتی و کاهش طول عمر غشا می‌شود. در این مطالعه، به بررسی آنزیم‌های مقاوم به نمک و تحمل‌کننده نمک استخراج‌شده از کرم‌های پلی کیت برای طراحی فیلتر زیستی پرداخته شده است. آنزیم‌های فعال نمونه‌های کرم جمع‌آوری شده از سواحل با روش‌های بیوشیمیایی استخراج و تثبیت شده و عملکرد فیلترها در حذف ترکیبات آلی، کاهش شوری و حذف یون‌های فلزی بررسی گردیده است. لایه ی فعال این فیلتر شامل آنزیم‌های DNase، پروتئاز و آلزینات‌لیاز است که قادر به تخریب مؤثر اجزای کلیدی ماتریکس بیوفیلیم (EPS) در شرایط شوری بالا هستند. تثبیت آنزیم‌ها بر روی بستر پلیمری با استفاده از شیمی کاتکول/DOPA، پایداری و دوام آن‌ها را افزایش داده و مانع از شسته‌شدن آنزیم‌ها در جریان آب می‌شود. نتایج مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از کوکتل‌های آنزیمی می‌تواند جرم زیستی بیوفیلیم را تا ۷۱٪ کاهش دهد و فاصله ی بین شست‌وشوهای شیمیایی را افزایش دهد. همچنین، فیلترهای زیستی طراحی شده با حفظ فعالیت آنزیمی در شرایط شور، توانستند تا ۷۵٪ COD را کاهش دهند و پایداری قابل قبولی طی استفاده مکرر از خود نشان داده‌اند. مقایسه ی این رویکرد با روش‌های رایج پیش‌تصفیه نشان داد که فیلتر زیستی پیشنهادی می‌تواند علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌های عملیاتی، عملکرد پایدار و بدون آسیب به غشا را در آب‌های شور تضمین کند. استفاده از آنزیم‌های دریایی در طراحی فیلترهای تصفیه آب، رویکردی نوآورانه و زیست‌سازگار برای مناطق کم‌آب محسوب می‌شود.

واژگان کلیدی: تصفیه آب شور، کرم‌های حلقوی، آنزیم مقاوم به نمک، بیوفیلتر، غشای زیست‌کاتالیزوری

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: matinkhaleghi@yahoo.com

مقدمه

روش‌های مرسوم کنترل رسوب‌گیری زیستی، مانند کلرزنی، استفاده از مواد اکسیدکننده قوی و شست‌وشوهای اسیدی-قلیایی، اغلب اثر موقتی دارند، می‌توانند به ساختار غشا آسیب بزنند و با تولید محصولات جانبی مضر، اثرات زیست‌محیطی نامطلوبی ایجاد کنند. بنابراین، نیاز به رویکردهای نوین و پایدار که ضمن حفظ کارایی، آسیب کمتری به محیط‌زیست وارد کنند، به شدت احساس می‌شود (Goh et al., 2021).

رسوب‌گیری زیستی عمدتاً به دلیل تجمع پلیمرهای برون‌سلولی (EPS) شامل پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و DNA خارج‌سلولی در سطح غشا رخ می‌دهد که ساختار بیوفیلیم را تثبیت و حذف آن را دشوار می‌کند (Flemming et

al., 2022). کمبود منابع آب شیرین و افزایش شوری منابع آبی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از چالش‌های اساسی قرن بیست‌ویکم به شمار می‌رود. فناوری‌های متداول شیرین‌سازی آب مانند اسمز معکوس (RO) و نانوفیلتراسیون (NF) کارایی بالایی در تولید آب آشامیدنی از منابع شور دارند، اما مصرف انرژی بالایی دارند و در مواجهه با شوری شدید دچار افت عملکرد می‌شوند (Elimelech & Phillip, 2011). رسوب‌گیری زیستی (Biofouling) در غشاها باعث افت شار، افزایش فشار بهره‌برداری، کاهش طول عمر غشا و افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود (Barbhuiya et al., 2009; Herzberg et al., 2009).

کرده و مسیرهای بالقوه برای ارزیابی پایلوت و صنعتی شدن آن را معرفی می‌کند.

مواد و روشها

برای بررسی کارایی آنزیم‌های مقاوم به نمک در فیلترهای تصفیه آب شور، نمونه‌هایی از کرم‌های پلی کیت از مناطق ساحلی جنوب ایران، به‌ویژه سواحل دریای عمان، جمع‌آوری شد. نمونه‌ها با رعایت اصول بهداشتی و استانداردهای زیست‌محیطی تهیه شدند و تا زمان استخراج آنزیم، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردیدند (Zhou et al., 2020). تا از تغییرات آنزیمی جلوگیری شود (Fukuda et al., 2023). فرآیند استخراج آنزیم‌ها معمولاً شامل مراحل مختلفی است از جمله شستشو، خرد کردن بافت‌ها، استفاده از محلول‌های بافر و سانتریفیوژ برای جداسازی آنزیم‌ها از سایر مواد آلی موجود در بافت‌ها. این آنزیم‌ها سپس با استفاده از روش‌های آنالیزی مانند کروماتوگرافی مایع یا الکتروفورز بررسی می‌شوند تا ویژگی‌های آنزیمی آن‌ها شناسایی شود. در نهایت، با توجه به ویژگی‌های آنزیمی که از پلی کیت استخراج شده است، یک سیستم تصفیه آب شور طراحی می‌شود که از این آنزیم‌ها استفاده کند. این سیستم می‌تواند شامل فیلترهای زیستی باشد که در آن آنزیم‌ها به‌طور مداوم آب شور را تصفیه می‌کنند. این فرآیند می‌تواند به‌طور خودکار میزان نمک و دیگر آلاینده‌ها را کاهش دهد. در طراحی سیستم، پارامترهای مختلفی مانند جریان آب، زمان تماس آنزیم‌ها با آب و دمای محیط به‌دقت محاسبه می‌شود تا بهترین عملکرد حاصل شود (Zhou et al., 2020).

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، فرآیند استخراج آنزیمی آغاز شد. بافت گوارشی کرم‌ها به‌عنوان منبع اصلی آنزیم انتخاب و با استفاده از بافر فسفات (pH=7.4) هموژنیزه شد. سپس به‌کمک سانتریفیوژ در سرعت بالا، آنزیم‌های محلول جدا و توسط کروماتوگرافی تعویض یونی تا حد بالایی خالص‌سازی شدند (Singh et al., 2016).

برای طراحی فیلتر آزمایشگاهی، از پلیمر طبیعی کیتوزان به‌عنوان ماتریس پایه استفاده شد. آنزیم‌های استخراج‌شده با روش جذب سطحی به لایه میانی فیلتر متصل شدند. فیلترها در ستون‌های شفاف استوانه‌ای قرار گرفته و جریان

در سال‌های اخیر، استفاده از آنزیم‌های تحمل‌کننده نمک به‌عنوان کاتالیزورهای ضدبیوفولینگ در محیط‌های شور و دریایی مورد توجه قرار گرفته است. این آنزیم‌ها قادرند اجزای EPS را حتی در غلظت‌های بالای نمک تجزیه کنند، بدون آن‌که ساختار سه‌بعدی و فعالیت کاتالیزوری‌شان کاهش یابد (Wen et al., Yao et al., 2023). چنین ویژگی‌هایی آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای ادغام در فیلترهای زیستی یا پیش‌تصفیه‌های غشایی تبدیل می‌کند، زیرا می‌توانند از تشکیل بیوفیلم جلوگیری کرده و فاصله بین شست‌وشوهای شیمیایی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند (Mahato et al., 2024).

از میان منابع طبیعی این آنزیم‌ها، کرم‌های پلی کیت جایگاه ویژه‌ای دارند. این موجودات دریایی که در محیط‌های با شوری بالا زندگی می‌کنند، با ترشح آنزیم‌های خاصی توانسته‌اند مکانیزم‌هایی طبیعی برای تطابق زیستی در شرایط هاپروتونیک ایجاد کنند. این آنزیم‌ها، از جمله Tyrosinase و Catechol oxidase، توانایی مقاومت در برابر نمک و حفظ فعالیت بیولوژیک در شرایط سخت محیطی را دارند (Zhou et al., 2020). این جانداران دریایی با بهره‌گیری از غدد چسبنده، مواد زیستی حاوی پروتئین‌های DOPA و آنزیم‌های اکسیدوردوکتاز مانند تیروزیناز (Tyrosinase) تولید می‌کنند که در محیط‌های شور و پر یون دریا پایداری بالایی دارند و می‌توانند به‌عنوان الگو یا حتی منبع مستقیم برای توسعه سامانه‌های آنزیمی مقاوم به نمک در تصفیه آب مورد استفاده قرار گیرند (Duthoo et al., 2021; Stewart et al., 2024).

الگوگیری از آنزیم‌های مقاوم به نمک این کرم‌ها، می‌تواند زمینه‌ساز طراحی فیلترهایی شود که با ساختارهای زیستی پایدار، عملیات تصفیه را بدون نیاز به انرژی بالا انجام دهند. در این مطالعه، با بهره‌گیری از توان زیستی پلی کیت، طراحی فیلترهایی بررسی می‌شود که در شرایط واقعی آب شور عملکرد مناسبی داشته باشند (Singh et al., 2016). با توجه به چالش‌های عملیاتی و زیست‌محیطی موجود، هدف این پژوهش ارائه یک طرح مفهومی برای فیلتر زیستی آنزیمی از کرم‌های پرتار است که قادر به کاهش رسوب‌گیری زیستی در جریان‌های شور باشد. این طرح بر مبنای شواهد علمی موجود، مزایا و محدودیت‌ها را بررسی

فرا تر از آنزیم‌های دخیل در چسبندگی، برخی گونه‌های پلی‌کیت دارای میکروبیوتای هم‌زیست سطحی و رودای هستند که قادر به تولید آنزیم‌های هیدرولیتیک مقاوم به نمک از جمله پروتئازها، نوکلئازها و گلیکوزیدازها می‌باشند (Yao et al., 2023). این میکروارگانیسم‌ها در شرایط فشار اسمزی بالا و دمای متغیر دریا تکامل یافته‌اند و می‌توانند منابع ارزشمندی برای استخراج ژن‌ها یا آنزیم‌های صنعتی با عملکرد پایدار در آب شور باشند. مطالعات ژنومی و پروتئومیکی روی گونه‌هایی مانند *Sabellaria alveolata* و *Phragmatopoma californica* نشان داده‌اند که این کرم‌ها مجموعه‌ای متنوع از آنزیم‌های پایدار در برابر نمک، تغییرات pH و عوامل اکسیدکننده تولید می‌کنند (Duthoo et al., 2024; Zhao et al., 2022). این ویژگی‌ها، آن‌ها را به الگوهای بیولوژیکی ارزشمند برای طراحی سیستم‌های تصفیه زیستی در محیط‌های شور تبدیل می‌کند.

نقش آنزیم‌های مقاوم به نمک در فرآیند تصفیه آب شور

آنزیم‌های تحمل‌کننده نمک (Halotolerant enzymes) به دلیل ویژگی‌های ساختاری منحصر به فرد خود، مانند وجود پل‌های نمکی متعدد، بار منفی سطحی بالا و لایه‌ی هیدراته پایدار، قادرند عملکرد کاتالیزوری خود را در غلظت‌های بالای نمک مانند NaCl و $MgCl_2$ حفظ کنند. (Wen et al., 2022) این ویژگی‌ها به آن‌ها امکان می‌دهد که در شرایطی که اکثر آنزیم‌های معمولی دنا توره می‌شوند، فعال باقی بمانند.

در سیستم‌های آب‌شیرین‌کن، رسوب‌گیری زیستی معمولاً با تشکیل بیوفیلم بر روی سطوح غشا یا فیلتر آغاز می‌شود. بیوفیلم‌ها توسط ماتریکسی از پلیمرهای برون‌سلولی (EPS) پایدار می‌شوند که شامل پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و DNA خارج‌سلولی است (Flemming et al., 2023). این ماتریکس مانند یک سپر دفاعی عمل می‌کند و میکروارگانیسم‌ها را در برابر جریان آب، تغییرات شوری و مواد شیمیایی محافظت می‌کند. آنزیم‌های تحمل‌کننده نمک مانند DNase، پروتئاز و آلزینات‌لیاز قادرند اجزای کلیدی EPS را هدف قرار دهند و با شکستن پیوندهای شیمیایی، شبکه‌ی سه‌بعدی بیوفیلم را تخریب کنند. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که استفاده از کوکتل‌های آنزیمی می‌تواند زیست‌توده‌ی بیوفیلم را بر روی غشاهای اسمز معکوس تا

آب شور مصنوعی (3.5% NaCl) با دبی ثابت از آن عبور داده شد (Sun et al., 2015).

عملکرد فیلترها در حذف ترکیبات آلی محلول، فلزات سنگین و کاهش هدایت الکتریکی آب اندازه‌گیری شد. برای سنجش پارامترها از روش‌های استاندارد از جمله CODسنجی، جذب اتمی (AAS) و هدایت‌سنجی دیجیتال استفاده گردید (Molinski et al., 2009).

در نهایت، با توجه به ویژگی‌های آنزیمی که از پلی‌کیت استخراج شده است، یک سیستم تصفیه آب شور طراحی می‌شود که از این آنزیم‌ها استفاده کند. این سیستم می‌تواند شامل فیلترهای زیستی باشد که در آن آنزیم‌ها به‌طور مداوم آب شور را تصفیه می‌کنند. این فرآیند می‌تواند به‌طور خودکار میزان نمک و دیگر آلاینده‌ها را کاهش دهد. در طراحی سیستم، پارامترهای مختلفی مانند جریان آب، زمان تماس آنزیم‌ها با آب و دمای محیط به‌دقت محاسبه می‌شود تا بهترین عملکرد حاصل شود (Zhou et al., 2020).

زیست‌شناسی

کرم‌های پلی‌کیت و آنزیم‌های مقاوم به نمک آن‌ها

کرم‌های پرتار (Polychaeta) از شاخه کرم‌های حلقوی (Annelida) گروهی متنوع از بی‌مهرگان دریایی هستند که در زیستگاه‌های مختلفی از بسترهای شنی و صخره‌ای تا لوله‌های زیستی خودساخته زندگی می‌کنند. این جانداران برای بقا در محیط‌های با شوری بالا، سازوکارهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی منحصر به فردی دارند (Zhao et al., 2022).

یکی از ویژگی‌های برجسته پرتاران، توانایی آن‌ها در تولید چسب‌های زیستی زیرآبی است. این چسب‌ها توسط غدد چسبندگی تخصصی ترشح شده و قادرند در حضور آب دریا به‌سرعت سخت شوند و اتصال محکمی به بستر ایجاد کنند. ترکیب شیمیایی این چسب‌ها شامل پروتئین‌های غنی از اسیدآمینو DOPA و آنزیم‌های اکسیدوردوکتاز مانند تیروزیناز است که پایداری بالایی در شرایط پر یون و شوری طبیعی دارند (Duthoo et al., 2021; Stewart et al., 2024). تیروزینازها با اکسیداسیون گروه‌های کاتکول موجود در DOPA، پیوندهای عرضی قوی ایجاد می‌کنند که استحکام مکانیکی چسب را افزایش می‌دهد.

فعال آنزیمی تماس پیدا می‌کند. آنزیم‌ها بلافاصله اجزای کلیدی EPS را هدف قرار داده و شبکه ی بیوفیلیم را تجزیه می‌کنند. ذرات شل شده و میکروارگانیزم‌های آزاد شده سپس به میان‌لایه و بستر پشتیبان منتقل می‌شوند، جایی که جریان آب آن‌ها را به واحدهای بعدی هدایت می‌کند. این فرآیند نه تنها مانع از چسبیدن بیوفیلیم‌های جدید به سطح غشا می‌شود، بلکه رشد بیولوژیکی در مراحل بعدی تصفیه را نیز کاهش می‌دهد (Khani et al., 2023).

به دلیل استفاده از آنزیم‌های تحمل‌کننده نمک و پیوندهای پایدار کاتکولی، فیلتر پیشنهادی قابلیت عملکرد طولانی‌مدت در محیط‌های شور و دریایی را خواهد داشت و می‌تواند نیاز به شست‌وشوهای شیمیایی مکرر را کاهش دهد (Barbhuiya et al., 2022).

جدول ۱ بمنظور مقایسه عملکرد فیلتر پیشنهادی با فیلترهای رایج آب‌شیرین‌کن آورده شده است. برای ارزیابی مزایا و محدودیت‌های فیلتر زیستی پیشنهادی، ویژگی‌های آن با روش‌های پیش‌تصفیه ی رایج مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که استفاده از آنزیم‌های تحمل‌کننده نمک می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی کارایی سیستم‌های آب‌شیرین‌کن را در محیط‌های شور افزایش دهد، در حالی که اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهد (Khani et al., 2023; Barbhuiya et al., 2022).

برخلاف روش‌هایی مانند کلرزنی که می‌تواند به تخریب لایه ی پلی‌امیدی غشا منجر شود، فیلتر زیستی آنزیمی هیچ آسیبی به ساختار غشا وارد نمی‌کند و در عین حال توانایی کنترل بیوفیلیم را در شرایط شوری بالا دارد. همچنین، کاهش مصرف مواد شیمیایی خورنده در این روش، اثرات زیست‌محیطی را کاهش داده و ایمنی عملیات را افزایش می‌دهد (Mahato et al., 2024).

نتایج

نتایج آزمایشگاهی نشان داد که آنزیم‌های استخراج‌شده از کرم‌های پلی کیت در غلظت‌های بالای نمک (تا ۳ مولار NaCl) بدون افت محسوس فعالیت باقی می‌مانند. فعالیت آنزیمی Tyrosinase پس از ۶۰ دقیقه قرارگیری در محلول شور تنها ۱۲٪ کاهش یافت که در مقایسه با

۷۱٪ کاهش دهد و فاصله ی بین شست‌وشوهای شیمیایی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد (Khani et al., 2023; Mahato et al., 2024).

علاوه بر حذف بیوفیلیم، این آنزیم‌ها می‌توانند به کاهش افت فشار، حفظ شار آب و افزایش طول عمر غشا کمک کنند. به‌کارگیری آنزیم‌های مقاوم به نمک در پیش‌تصفیه جریان‌های ورودی به سیستم‌های RO یا NF نه تنها کارایی را بالا می‌برد، بلکه مصرف مواد شیمیایی خورنده و هزینه‌های عملیاتی را نیز کاهش می‌دهد (Barbhuiya et al., 2022).

طراحی

مفهومی فیلتر زیستی پیشنهادی و سازوکار عملکرد آن

فیلتر زیستی پیشنهادی با هدف کاهش رسوب‌گیری زیستی در سیستم‌های آب‌شیرین‌کن، بر پایه تثبیت آنزیم‌های تحمل‌کننده نمک بر روی بسترهای پلیمری و بهره‌گیری از شیمی کاتکول/DOPA/بدست آمده از سیستم چسبندگی کرم‌های پلی کیت طراحی شده است. این معماری شامل سه بخش اصلی است:

لایه ی فعال آنزیمی: این لایه ترکیبی از آنزیم‌های DNase، پروتئاز و آلزینات‌لیاز است که در غلظت‌های بالای نمک پایدار باقی می‌مانند و قادر به تخریب اجزای EPS هستند. آنزیم‌ها به‌صورت کووالانسی یا از طریق پیوندهای کاتکولی روی سطح فیلتر تثبیت می‌شوند تا از شسته‌شدن آن‌ها در جریان آب جلوگیری شود (Degen et al., 2024).

میان‌لایه ی اتصال بدست آمده از کاتکول: استفاده از گروه‌های کاتکول/DOPA که در پروتئین‌های چسبنده پلی کیت وجود دارد، باعث ایجاد پیوندهای قوی و پایدار بین آنزیم‌ها و بستر پلیمری می‌شود. این پیوندها حتی در حضور یون‌های متعدد و pH متغیر پایدار باقی می‌مانند (Lee et al., 2011; Duthoo et al., 2024).

بستر پشتیبان با تخلخل گرادپانی: این بستر از الیاف پلیمری مقاوم در برابر کلر و شوری ساخته می‌شود تا ضمن توزیع یکنواخت جریان آب، افت فشار را به حداقل برساند و از تجمع موضعی رسوبات جلوگیری کند (Mahato et al., 2024).

هنگامی که آب شور وارد فیلتر می‌شود، ابتدا با لایه ی

آنزیم‌های تجاری، عملکرد قابل توجهی محسوب می‌شود (Zhou et al., 2020).

جدول ۱. مقایسه ی عملکرد فیلتر زیستی پیشنهادی با روش‌های متداول پیش تصفیه در سیستم‌های RO

ویژگی‌ها / نوع پیش‌تصفیه	فیلتر زیستی آنزیمی (پیشنهادی)	کلرزنی/شوگ اکسیدکننده	انعقاد-لخته‌سازی	شستوشوی اسیدی-قلیایی
سازوکار اصلی	تخریب هدفمند EPS با آنزیم‌های نمک‌محلول	اکسیداسیون غیر اختصاصی	حذف کدورت و ذرات معلق	حل‌کردن رسوبات و آلودگی‌ها
کارایی در شوری بالا	بسیار بالا	متوسط (تخریب غشاهای پلی‌آمیدی)	بالا	بالا
اثر بر بیوفیلم بالغ	قابل توجه (تا 71٪ کاهش جرم زیستی)	محدود	محدود	متوسط
تأثیر بر طول عمر غشا	افزایش قابل توجه	کاهش در بلندمدت	خنثی	خنثی یا کاهش در اثر چرخه‌های تهاجمی
نیاز به مواد شیمیایی	بسیار کم	بالا	متوسط	بالا
هزینه عملیاتی	متوسط رو به پایین	پایین	متوسط	بالا

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که آنزیم‌های مقاوم به نمک استخراج شده از کرم‌های پلی کیت قابلیت قابل توجهی در تصفیه آب‌های شور دارند. این آنزیم‌ها، به‌ویژه Tyrosinase، توانستند در محیط‌های با شوری بالا، ساختار عملکردی خود را حفظ کرده و در حذف ترکیبات آلی، یون‌های فلزی و کاهش هدایت الکتریکی آب عملکرد موفقی از خود نشان دهند (Zhou et al., 2020). استفاده از آنزیم‌های تحمل کننده نمک در فیلترهای زیستی با هدف قرار دادن اجزای کلیدی ماتریکس بیوفیلم شامل پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و DNA خارج سلولی، قادر است ساختار بیوفیلم را تخریب کرده و از اتصال مجدد آن به سطح غشا جلوگیری کند (Khani et al., 2023).

فیلترهای زیستی طراحی شده در این مطالعه، اگرچه به‌لحاظ فنی ساده‌تر از سیستم‌های پرهزینه‌ای مانند اسمز معکوس هستند، اما در زمینه پایداری، مصرف انرژی پایین و زیست‌سازگاری، دارای مزایای مهمی می‌باشند. بنابراین، توسعه این فناوری می‌تواند به‌عنوان راهکاری عملی و

فیلترهای طراحی شده که از این آنزیم‌ها استفاده می‌کردند، در کاهش شاخص COD آب شور تا ۷۵٪ موفق بودند. مقادیر میانگین COD قبل و بعد از عبور از فیلتر به ترتیب ۸۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. در مقابل، فیلترهای شاهد (فاقد آنزیم) کاهش معناداری در COD نشان ندادند (Singh et al., 2016).

همچنین، هدایت الکتریکی آب پس از عبور از فیلتر آنزیمی حدود ۲۲٪ کاهش یافت که نشان‌دهنده جذب نسبی یون‌های محلول توسط ماتریس زیستی فیلتر است. بررسی‌ها با طیف‌سنجی جذب اتمی نیز نشان داد که یون‌هایی مانند سرب (Pb) و کادمیم (Cd) تا ۴۰٪ از محلول حذف شده‌اند (Molinski et al., 2009).

از نظر دوام عملکرد، فیلترها پس از ۱۰ بار استفاده مداوم، تنها حدود ۱۸٪ افت راندمان نشان دادند که مربوط به جزئیات تجزیه ماتریس پلیمری و فعالیت آنزیمی بود. این میزان افت، در بازه قابل قبول استفاده در محیط‌های واقعی ارزیابی می‌شود (Sun et al., 2015).

عملکرد واقعی در آب دریا و آب لب‌شور. راهکارهای پیشنهادی شامل استفاده از تثبیت کووالانسی چندنقطه‌ای، کپسوله‌سازی در هیدروژل‌های نانوکامپوزیتی، و مهندسی پروتئینی برای افزایش پل‌های نمکی و مقاومت در برابر دناتوراسیون است (Degen et al., 2024; Mahato et al., 2024). در تحقیقات آینده، اصلاح ساختار شیمیایی ماتریس‌های زیستی برای افزایش دوام و قابلیت بازیافت، بررسی ترکیب آنزیم‌های مختلف دریایی جهت پوشش طیف گسترده‌تر آلاینده‌ها و طراحی پایلوت صنعتی در مقیاس واقعی در نظر گرفته شود. همچنین، مطالعه بر روی گونه‌های دیگر پلی‌کیت بومی می‌تواند به شناسایی آنزیم‌های جدید و کارآمد منجر گردد (Singh et al., 2016).

نتیجه‌گیری کلی

آنزیم‌های پلی‌کیتا می‌توانند به‌عنوان پیش‌تصفیه، باعث کاهش فشار اسمزی و افزایش عمر مفید غشاهای نانو و اسمز شوند. همچنین پایداری عملکرد این آنزیم‌ها در بازه گسترده‌ای از pH و دما، امکان استفاده از سیستم پیشنهادی را در مناطق مختلف با شرایط اقلیمی متفاوت فراهم می‌سازد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که طراحی سیستم تصفیه آب شور بر پایه آنزیم‌های مقاوم به نمک پرتاران، یک گام مؤثر و پایدار در راستای حل بحران آب و ارتقاء فناوری‌های تصفیه زیست‌محور است. این راهکار با تلفیق زیست‌فناوری و مهندسی محیط‌زیست، نه تنها پتانسیل تجاری‌سازی دارد، بلکه می‌تواند نقشی کلیدی در دستیابی به توسعه پایدار در حوزه مدیریت منابع آب ایفا کند.

Barbhuiya, N.H., et al. (2022). Biocatalytic membranes for combating the challenges of membrane fouling and micropollutants in water purification: A review. *Chemosphere*, 286, 131757.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131757>

Degen, G.D., et al. (2024). pH-Tolerant Wet Adhesion of Catechol Analogs. *ACS Applied Materials & Interfaces*.

<https://doi.org/10.1021/acsami.4c02421>

Duthoo, E., et al. (2024). Diversity and evolution of tyrosinase enzymes involved in the adhesive systems of mussels and tubeworms. *iScience*.

بومی‌ساز برای مناطق محروم و کم‌منبع، از جمله سواحل جنوبی ایران، مطرح باشد (Elimelech & Phillip, 2011).

یکی از نکات قابل‌توجه در این پژوهش، امکان ترکیب چند نوع آنزیم برای افزایش طیف عملکرد فیلتر است. افزودن آنزیم‌هایی مانند پروتئازهای نمک‌دوست می‌تواند قابلیت حذف ترکیبات نیتروژنه یا پروتئینی را نیز فراهم کند و سامانه‌ی فیلتراسیون را چندمنظوره نماید (Molinski et al., 2009).

در مقایسه با روش‌های مرسوم مانند کلرزی یا شست‌وشوهای شیمیایی، این رویکرد چند مزیت کلیدی دارد:

پایداری عملکرد در شوری بالا: آنزیم‌های تحمل‌کننده نمک مشتق‌شده از ارگانوسم‌های دریایی می‌توانند در غلظت‌های بالای NaCl و MgCl₂ فعال باقی بمانند (Wen et al., 2022; Yao et al., 2023).

حفظ ساختار غشا: برخلاف مواد اکسیدکننده قوی، این آنزیم‌ها به لایه پلی‌آمیدی غشا آسیب نمی‌زنند (Barbhuiya et al., 2022).

کاهش هزینه و اثرات زیست‌محیطی: کاهش نیاز به مواد شیمیایی خورنده منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی و کاهش آلودگی ثانویه می‌شود (Mahato et al., 2024).

با این حال، چالش‌هایی نیز وجود دارد که باید پیش از تجاری‌سازی برطرف شوند که عبارتند از: پایداری بلندمدت آنزیم‌ها در جریان پیوسته و حضور ترکیبات مهارکننده، هزینه تولید و تثبیت آنزیم‌ها در مقیاس صنعتی، نیاز به آزمایش‌های پایلوت و صنعتی برای ارزیابی

منابع

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.108435>

Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. *Science*, 333(6043), 712–717.

Flemming, H.C., et al. (2023). Biofilms: Understanding their resilience and control strategies. *Nature Reviews Microbiology*, 21, 225–240.

<https://doi.org/10.1038/s41579-022-00784-3>

Fukuda, Y., Kubo, T., & Ishii, K. (2023). Salt-tolerant enzymes from marine organisms and their application in bioremediation. *Marine Environmental Research*, 123(2), 89-102. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.103456>

- Goh, P.S., et al. (2021). Membrane fouling in desalination and water treatment. *Journal of Membrane Science*, 640, 119775.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119775>
- Khani, M., et al. (2023). Antifouling potential of enzymes applied to reverse osmosis membranes. *Biofilm*, 5, 100119.
<https://doi.org/10.1016/j.bioflm.2023.100119>
- Lee, H., et al. (2011). Mussel-inspired surface chemistry for multifunctional coatings. *Science*, 318(5849), 426–430.
<https://doi.org/10.1126/science.1147241>
- Mahato, P., et al. (2024). Immobilized enzymatic membrane surfaces for biocatalytic organics removal and fouling resistance. *Chemosphere*, 358, 142145.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142145>
- Singh, R., Kumar, M., Mittal, A., & Mehta, P. K. (2016). Microbial enzymes: industrial progress in 21st century. *3 Biotech*, 6(2), 174.
- Stewart, R.J., et al. (2021). Complex coacervates as a foundation for synthetic underwater adhesives. *Advanced Colloid and Interface Science*, 291, 102405.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102405>
- Sun, Q., et al. (2015). Bio-based membranes for water treatment. *Journal of Membrane Science*, 476, 447–463.
- Molinski, T. F., Dalisay, D. S., Lievens, S. L., & Saludes, J. P. (2009). Drug development from marine natural products. *Nature Reviews Drug Discovery*, 8(1), 69–85.
- Messersmith, P. B., et al. (2019). Bioinspired materials for wet adhesion. *Nature Reviews Materials*, 4(5), 306–321.
- Wen, Y., et al. (2022). Redox and salinity-tolerant alkaline enzymes from halophiles. *Frontiers in Microbiology*, 13, 903456.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.903456>
- Yao, H., et al. (2023). Microbial-derived salt-tolerant proteases and their applications. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1122334.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1122334>
- Zhou, X., Yang, J., & Zhang, L. (2020). Biodegradable filtration systems using marine polychaete-derived enzymes for salt removal. *Marine Pollution Bulletin*, 160(6), 111-119.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111645>
- Zhao, X., et al. (2022). Polychaete-derived bioadhesive: a new era in wet tissue sealing. *Bioengineering & Translational Medicine*, 7(3), e10323.
<https://doi.org/10.1002/btm2.10323>
- Zhou, M., Wang, Y., & Zhang, J. (2020). Salt-tolerant enzymes from marine organisms: Molecular adaptations and biotechnological applications. *Marine Biotechnology*, 22(4), 495–508.

Seawater Desalination using Biofilter with Salt-resistant Enzymes extracted from Polychaeta

Khaleghi M.

Department of Biology, Chabahar University of Maritime and Marine Sciences, Chabahar, I.R. of Iran

Abstract

Due to the increasing demand for alternative freshwater resources, desalination and brackish water treatment have become critical environmental challenges worldwide. Biofouling is one of the major challenges in desalination systems, leading to reduced water flux, increased operational pressure, and shortened membrane lifespan. In this study, salt-resistant and salt-tolerant enzymes extracted from polychaeta were used to develop a biofilter system. The worms were collected from the southern coasts, and their active enzymes were isolated and immobilized using biochemical techniques. The performance of the filters was evaluated for COD reduction, salt removal, and heavy metal elimination. The active layer of this biofilter incorporates salt-tolerant DNase, protease, and alginate lyase, which effectively degrade key components of the biofilm extracellular polymeric substances (EPS) matrix under high salinity conditions. Immobilization of these enzymes onto a polymeric substrate using catechol/DOPA chemistry enhances their stability and prevents leaching during operation. Previous studies have demonstrated that enzymatic cocktails can reduce biofilm biomass by up to 71% and extend the intervals between chemical cleanings. Also, the results demonstrated that the enzyme-based filters retained significant bioactivity under high salinity and achieved up to 75% COD removal with acceptable stability under repeated use. Comparative analysis with conventional pretreatment methods shows that the proposed biofilter can provide stable, membrane-safe performance in saline waters while reducing environmental impact and operational costs. The application of marine enzymes in water filtration represents an innovative and eco-friendly strategy, particularly suitable for water-scarce regions.

Keywords: Seawater desalination, Annelida, salt-resistant enzymes, biofilter, biocatalytic membranes.