



مروری بر روش‌های نوین تصفیه آب و فاضلاب با تأکید بر فناوری‌های زیستی و تاثیر آن‌ها بر بهبود کیفیت محیط زیست

فاطمه کریمی‌پور^{۱*}، سیما سبزلعلی‌پور^۲، مریم محمدی روزبهانی^۳

۱- دانشجوی دکترای گروه محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

۲- دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

۳- دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

* ایمیل نویسنده مسول: F.karimipour134@gmail.com

چکیده

آب، منبع حیاتی حیات، تحت تأثیر آلودگی‌های صنعتی، کشاورزی و شهری قرار دارد که تصفیه آن برای حفظ منابع آبی و اکوسیستم‌ها ضروری است. این مقاله با هدف ارزیابی و تحلیل روش‌های نوین تصفیه آب و فاضلاب، به‌ویژه فناوری‌های زیستی نوین و نقش آن‌ها در بهینه‌سازی محیط زیست، به بررسی بیوراکتورهای غشایی (MBR)، سیستم‌های تصفیه با گیاهان (Phytoremediation)، تصفیه بیولوژیکی با جلبک‌ها (Algal bioremediation)، فرایندهای بی‌هوازی (Anaerobic digestion) و Bioaugmentation می‌پردازد. در این راستا، مزایا، معایب، کارایی و پایداری هر روش در شرایط مختلف ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهند که فناوری‌های زیستی نوین، با راندمان بالا در حذف آلاینده‌ها، کاهش مصرف انرژی، تولید لجن کمتر و امکان بازیابی منابع (مانند بیوگاز)، نقش مؤثری در بهینه‌سازی محیط زیست ایفا می‌کنند. این روش‌ها، با ارائه راهکارهای پایدار و اقتصادی، به ایجاد یک اقتصاد چرخشی در مدیریت آب و فاضلاب کمک کرده و گامی مؤثر در جهت حفاظت از منابع آبی و محیط زیست محسوب می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: تصفیه آب و فاضلاب، فناوری‌های زیستی، بهینه‌سازی محیط‌زیست.

۱- مقدمه

تنش آبی یکی از چالش‌های اساسی قرن حاضر، بسیاری از مناطق جهان را با کمبود منابع آب آشامیدنی سالم مواجه کرده است. این کمبود، علاوه بر افزایش تقاضای ناشی از رشد جمعیت و شهرنشینی [۲۰]، با آلودگی گسترده منابع آبی نیز تشدید می‌شود. آلودگی ناشی از ورود طیف وسیعی از آلاینده‌ها، از جمله فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها، ترکیبات دارویی و سایر مواد شیمیایی، سلامت انسان و اکوسیستم‌ها را به طور جدی تهدید می‌کند [۴۳-۲۴]. عوارض این آلودگی شامل بیماری‌های گوارشی، مشکلات کلیوی، اختلالات عصبی، مشکلات رشدی در کودکان، اتروفیکاسیون، کاهش اکسیژن آب و آسیب به تنوع زیستی می‌شود [۴۴-۴۰]. اثرات مخرب آلودگی آب تنها به اکوسیستم‌های آبی محدود نمی‌شود و می‌تواند از طریق چرخه آب به اکوسیستم‌های خشکی نیز آسیب برساند. وجود آلاینده‌ها در رسوبات رودخانه‌ای نیز چالش‌های زیست‌محیطی بلندمدتی را ایجاد می‌کند [۳۲].

در این شرایط، تصفیه فاضلاب نقش حیاتی در حفظ منابع آب و سلامت عمومی ایفا می‌کند [۲۵-۱۶]. اما روش‌های سنتی تصفیه با محدودیت‌هایی از جمله مصرف انرژی بالا، تولید لجن و ناکارایی در حذف آلاینده‌های نوظهور روبرو هستند [۴]. از سوی دیگر، توسعه سریع فناوری‌های زیستی نوین در زمینه تصفیه فاضلاب، فرصت‌های نوینی را برای غلبه بر این موانع و دستیابی به تصفیه پایدار و کارآمد ارائه می‌دهد [۳۷]. فناوری‌هایی نظیر بیوراکتورهای غشایی (MBR)، سیستم‌های تصفیه با



گیاهان، تصفیه بیولوژیکی با جلبک‌ها، فرآیندهای بی‌هوازی و زیست‌افزایشی، با تکیه بر فرآیندهای طبیعی، پتانسیل کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهبود کیفیت پساب را دارا می‌باشند. در این راستا، فناوری‌های تحقیقاتی برای تصفیه فاضلاب سازگار با محیط زیست باید در اولویت قرار گیرد تا مفهوم مدل اقتصاد چرخشی به‌عنوان گزینه‌ای برای حفظ و نگهداری مدیریت منابع محقق شود [۳].

تحقیقات انجام شده در زمینه تصفیه فاضلاب، طیف گسترده‌ای از رویکردهای نوین را در بر می‌گیرد که از فناوری‌های زیستی مبتنی بر جلبک‌ها و گیاهان تا سیستم‌های پیشرفته MBR و فرآیندهای ترکیبی را شامل می‌شود. در این راستا: عبدالکریم و فاتی [۱] بر اهمیت استفاده از جلبک‌ها به‌عنوان یک راهکار پایدار برای تصفیه فاضلاب و حذف آلاینده‌ها، به ویژه فلزات سنگین، در مقیاس‌های مختلف (صنعتی، شهری، کشاورزی) تاکید می‌کنند. مطالعات کاسموری و همکاران [۲۳] و رسول و همکاران [۳۴] نیز به ترتیب، کارایی نیلوفر آبی و سنبل آبی را در کاهش آلاینده‌ها و انباشت فلزات سنگین در فاضلاب نشان می‌دهند که پتانسیل بالای این گیاهان در فرآیندهای گیاه‌پالایی را برجسته می‌سازد. شیری و همکاران [۳۹] استفاده از نانوکامپوزیت PAN/GO در MBR برای تصفیه فاضلاب استخر میگو را مورد بررسی قرار داده و بهبود عملکرد سیستم با استفاده از نانوذرات GO و جلبک *Dunaliella salina* را نشان می‌دهند. امانوئل و همکاران [۱۵] به اهمیت MBR برای تصفیه فاضلاب صنعتی در کشورهای در حال توسعه و چالش‌های عملیاتی مرتبط با آن اشاره می‌کنند. رحمان و همکاران [۳۳] نیز به بررسی پیشرفت‌های MBR، مقایسه آن با روش‌های سنتی، و ویژگی‌های ساختاری و طراحی سیستم‌های MBR می‌پردازند. همچنین ژوا و همکاران [۴۶] به مرور فرآیندهای نیترات‌زدایی و استفاده از فناوری غشایی برای بازیابی نیتروژن می‌پردازند. همچنین، مطالعه مصرزاده و همکاران به بررسی روش‌های کاهش سولفید هیدروژن در بیوگاز تولیدی از لجن فاضلاب با استفاده از هوادهی جزئی می‌پردازد. ایلانگو و سیردهاران [۲۱] استفاده از تقویت زیستی را به‌عنوان یک روش پایدار و موثر برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و حذف فلزات سنگین بررسی می‌کنند. دنگ و همکاران [۱۳] نیز استفاده از ترکیب "هضم بی‌هوازی" با فرآیند "partial nitrification/anammox" را به‌عنوان راهکاری برای تصفیه فاضلاب صنعتی حاوی نیتروژن و مواد آلی با مزایایی همچون حذف موثر آلاینده‌ها، بازیابی انرژی، و کاهش انتشار کربن مورد توجه قرار می‌دهند. به‌طور کلی، تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که فناوری‌های نوین تصفیه فاضلاب، از جمله روش‌های زیستی و MBR، پتانسیل بالایی برای بهبود کیفیت پساب و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از آلودگی آب دارند. با این حال، توسعه و تجاری‌سازی این فناوری‌ها نیازمند توجه به چالش‌های عملیاتی، بهینه‌سازی طراحی سیستم‌ها و انجام مطالعات بیشتر در مقیاس‌های بزرگ‌تر است.

این مقاله با هدف ارزیابی و تحلیل این روش‌های نوین تصفیه آب و فاضلاب، به‌ویژه با تمرکز بر فناوری‌های زیستی ذکر شده و نقش آن‌ها در بهینه‌سازی محیط‌زیست تدوین شده است. این بررسی، ضمن تشریح چالش‌های موجود و استانداردهای زیست‌محیطی مرتبط، به تحلیل مزایا، معایب و فرصت‌های این فناوری‌های زیستی پیشرفته می‌پردازد و پتانسیل آن‌ها را در ایجاد یک سیستم تصفیه پایدار و سازگار با محیط زیست ارزیابی می‌کند.

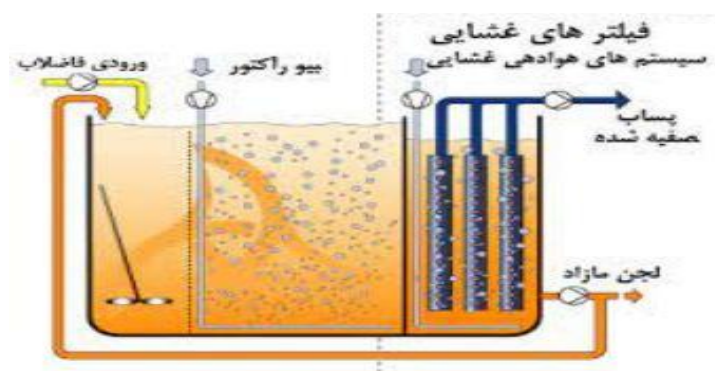
۲- مواد و روش

در این پروژه تحقیقاتی از یک روش مرور سیستماتیک متون استفاده شده است. کار جستجوی جامع مبتنی بر کامپیوتر در پایگاه‌های داده دانشگاهی برای مشخص کردن مطالعاتی که در مورد سیستم‌های تصفیه فاضلاب سنتی و پیشرفته بحث می‌کنند، انجام شد. مطالعات بر اساس فناوری مورد استفاده و معیارهای ورود و خروج انتخاب شدند و از نظر کیفیت به دقت ارزیابی شدند. داده‌های گردآوری شده برای شناسایی روندها و زمینه‌های بالقوه برای بهبود از طریق ارزیابی انتقادی در مقایسه با سایر شیوه‌های مؤثر، تجزیه و تحلیل شدند. این فرآیند سیستماتیک با هدف انجام یک بررسی کامل و مبتنی بر شواهد از گزینه‌های تصفیه فاضلاب پایدار انجام شد.

۳- بررسی روش‌های نوین زیستی تصفیه آب و فاضلاب

۳-۱. بیوراکتورهای غشایی (MBR)

بیوراکتورهای غشایی (MBR) به عنوان یک فناوری پیشرفته، به طور فزاینده‌ای جایگزین روش‌های سنتی تصفیه بیولوژیکی فاضلاب شده‌اند (شکل ۱) [۸-۱۱]. MBR با تلفیق مزایای جداسازی غشایی و فرآیندهای بیولوژیکی، راندمان تصفیه را بهبود بخشیده، فضای اشغالی را کاهش داده و فاضلاب با کیفیت بالاتری تولید می‌کند [۱۵]. در این فناوری، به جای استفاده از مخزن ته‌نشینی ثانویه، از غشاهای اولترافیلتراسیون یا میکروفیلتراسیون برای جداسازی لجن از پساب استفاده می‌شود. این امر باعث غلبه بر مشکل بالکینگ لجن (Bulking) در روش‌های سنتی لجن فعال می‌گردد، اما هزینه اولیه و هزینه بهره‌برداری MBR معمولاً بالاتر از روش‌های سنتی است [۲۲].



شکل ۱: عملکرد بیوراکتورهای غشایی (MBR)

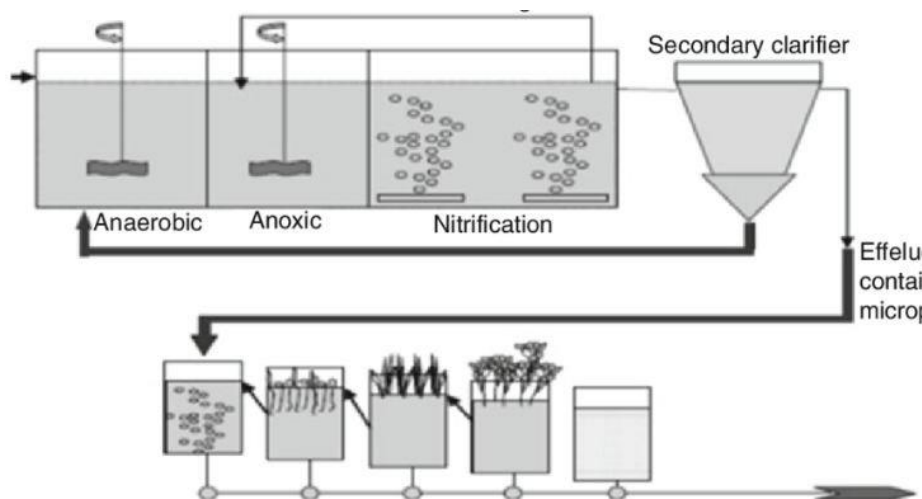
MBR امکان کنترل انعطاف‌پذیر زمان ماند هیدرولیکی (HRT) و زمان ماند لجن (SRT) را فراهم می‌آورد و با افزایش غلظت لجن فعال در مخزن هوادهای، سرعت تجزیه بیولوژیکی آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین، امکان اتوماسیون فرآیند و بازیافت مستقیم پساب را در بسیاری از موارد فراهم می‌کند. MBR مزایای متعددی از جمله جداسازی قوی زیست‌توده میکروبی، تولید لجن کمتری نسبت به روش‌های سنتی، پایداری عملکرد بالا و کیفیت بالای پساب خروجی دارد [۱۵-۳۳]. در سیستم‌های MBR، غشاهای متخلخل با جنس پلیمری به طور گسترده برای جلوگیری از ورود رسوبات، باکتری‌ها و ذرات کوچک به فاضلاب تصفیه شده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵]. این غشاهای به عنوان یک سد فیزیکی عمل کرده و تنها به آب تصفیه شده اجازه عبور می‌دهند و آلاینده‌هایی مانند میکروب‌ها و ذرات معلق را به دام می‌اندازند. گرفتگی غشا (fouling) یکی از مهم‌ترین مشکلات MBR است که می‌تواند باعث کاهش راندمان و افزایش هزینه‌ها شود [۳۹].

تحقیقات امیدوارکننده‌ای در زمینه استفاده از نانومواد در بیوراکتورهای غشایی (NMs-MBRs) برای تصفیه فاضلاب در حال انجام است [۳۱]. همچنین، فناوری‌های مدرن دیگری مانند سلول‌های سوختی میکروبی و بیوراکتورهای غشایی اسمزی بی‌هوازی نیز به منظور تصفیه مؤثرتر، مقرون به صرفه‌تر و با مصرف انرژی کمتر مورد بررسی قرار می‌گیرند [۴۶]. روش نوآورانه دیگری نیز از اسمز مستقیم و بیوراکتورهای غشایی برای تصفیه فاضلاب بهره می‌برد [۹]. این فناوری‌ها به دلیل پتانسیل بالا در تصفیه فاضلاب صنعتی و شهری، در حال بهبود و توسعه هستند و می‌توانند برای رفع نیازهای خاص، بهینه‌سازی شوند [۱۵].

۳-۲. سیستم‌های تصفیه با استفاده از گیاهان

گیاه‌پالایی به عنوان یک روش محبوب و پایدار برای تصفیه فاضلاب و بهبود کیفیت خاک شناخته می‌شود [۱۴]. این فناوری با استفاده از گیاهان و میکروارگانیسم‌ها، آلاینده‌ها را از محیط زیست حذف می‌کند (شکل ۲) [۲۳] و مزایای متعددی

از جمله هزینه کم، سازگاری با محیط زیست، بهبود منظر، بهره‌برداری و نگهداری آسان‌تری و راندمان تصفیه بالایی برای حذف آلاینده‌ها را ارائه می‌دهد [۳-۲۳].



شکل ۲: عملکرد سیستم‌های تصفیه با استفاده از گیاهان (Phytoremediation)

مکانیسم‌های حذف آلاینده‌ها توسط گیاهان با توجه به توانایی‌های طبیعی آن‌ها در حذف، تجزیه یا بی‌حرکت کردن آلاینده‌ها از محیط‌های مختلف، شکل می‌گیرد [۳۴]. برای مثال، برخی از گونه‌های گیاهی قادرند آلاینده‌ها را با بی‌حرکت شدن در ناحیه ریشه یا تجمع در ریشه و شاخه‌ها تصفیه کنند [۳۰]. همچنین، این روش می‌تواند برای حذف آلاینده‌های آلی و معدنی مختلف از جمله فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، گیاه‌پالایی دارای معایبی نیز هست، مانند نیاز به زمین زیاد، زمان طولانی برای دستیابی به نتایج و حساسیت به شرایط آب و هوایی همچنین، انتخاب گیاهان مناسب برای این فرآیند از چالش‌های اصلی به شمار می‌رود. در عین حال، فرصت‌هایی نیز برای بهبود کارایی حذف آلاینده‌ها وجود دارد [۳۴]. این روش در کاربردهای مختلفی مانند تصفیه فاضلاب شهری و کشاورزی و همچنین تصفیه رواناب‌های سطحی به کار می‌رود. به طور کلی، گیاه‌پالایی به عنوان یک فناوری سازگار با محیط زیست که می‌تواند به طور مؤثری آلاینده‌ها را حذف کند، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۲].

۳-۳. تصفیه بیولوژیکی با استفاده از جلبک‌ها

زیست‌پالایی با استفاده از جلبک‌ها به عنوان یک فناوری پایدار و مؤثر در تصفیه فاضلاب، به‌ویژه در عصر صنعتی‌شدن و شهرنشینی، توجه زیادی جلب کرده است. جلبک‌ها می‌توانند با جذب و خنثی‌سازی مواد مغذی و آلاینده‌های مختلف از جمله فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی، به کاهش آلودگی‌های محیطی کمک کنند [۱]. در فرآیند زیست‌پالایی، جلبک‌ها با تمرکز بر نیتروژن، فسفر و فلزات سنگین به تصفیه فاضلاب کمک می‌کنند. این موجودات زنده از طریق فرآیندهای بیوشیمیایی پیچیده، این مواد مغذی را جذب و به زیست‌توده و دیگر محصولات جانبی تبدیل می‌کنند. راندمان جذب مواد مغذی نیز به متغیرهایی از جمله نور، دما و pH وابسته است و گونه‌های مختلف جلبک‌ها در این زمینه عملکرد متفاوتی دارند [۱۲-۳۶]. استفاده از روش‌هایی مانند مهندسی ژنتیک و کشت مشترک می‌تواند به بهبود مصرف مواد مغذی کمک کند، اما نیاز به نظارت بر فرآیندها و ادغام آن‌ها با دیگر روش‌های تصفیه فاضلاب همواره احساس می‌شود [۱۸].

علاوه بر این، جلبک‌ها توانایی استثنائی در ترسیب فلزات سنگین مانند جیوه، کادمیوم، و کروم دارند. تجمع این فلزات سمی در بدن انسان می‌تواند منجر به مشکلات جدی از جمله ناهنجاری‌های رشد، سرطان و نارسایی کلیوی شود. در حالی که



روش‌های سنتی برای حذف فلزات سنگین به‌ندرت مؤثر و معمولاً گران هستند، جلبک‌ها به دلیل توانایی خود در جذب و تجمع فلزات از طریق جذب زیستی توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۵]. اثربخشی فرآیند جداسازی جلبکی تحت تأثیر پارامترهای محیطی چون pH و دما قرار دارد و تحقیقاتی در مهندسی ژنتیک به بهبود قابلیت‌های جلبک‌ها در این زمینه اشاره دارد. تجزیه آلاینده‌های آلی از جمله چالش‌های عمده در تصفیه فاضلاب است. آلاینده‌های آلی با ساختارهای شیمیایی پیچیده نیازمند فعالیت میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه هستند. جلبک‌ها به‌ویژه از تعاملات هم‌افزایی با باکتری‌ها بهره‌مند می‌شوند که اثربخشی تجزیه آلاینده‌ها را به میزان چشم‌گیری بهبود می‌بخشد. مثلاً، شرایط محیطی مانند دما و pH به‌علاوه اهمیت زیادی در کارآمدی این فرآیندها ایفا می‌کند. مطالعه بر روی صنعت خاکستر سودا در هند توانسته است پتانسیل زیست‌پالایی را در تصفیه پساب‌های صنعتی نشان دهد [۱].

انتقال مفاهیم همزیستی بین جلبک‌ها و باکتری‌ها در سیستم‌های زیست‌پالایی، از دیگر ابعاد این فناوری است که باعث بهبود تجزیه آلاینده‌ها می‌شود. باکتری‌ها با فعال کردن تبادل مواد مغذی و افزایش رشد و سلامت جلبک‌ها عملکرد سیستم زیست‌پالایی را بهبود می‌بخشند. این ترکیبات جلبکی-باکتریایی نشان‌دهنده پتانسیل‌های زیست‌پالایی هستند و روش‌های کاربردی به‌طور مکرر برای افزایش کارایی این سیستم‌ها در حال توسعه است. در حالی که چالش‌ها و محدودیت‌های موجود در ادغام این تعاملات به دقت بررسی نشده‌اند، بهره‌مندی از مهندسی ژنتیک می‌تواند موجب تقویت هم‌افزایی جلبک و باکتری‌ها شود که مزایای بیشتری برای تصفیه فاضلاب ایجاد می‌کند [۷].

در مجموع، جلبک‌ها با مکانیسم‌های خاص خود در زیست‌پالایی، نشان داده‌اند که می‌توانند به‌عنوان ابزارهای مؤثری در تصفیه فاضلاب عمل کنند. توانایی‌های آنها در جذب و حذف مواد مغذی، ترسیب فلزات سنگین و تجزیه آلاینده‌های آلی به همراه تعاملات مثبت با باکتری‌ها، این فرآیند را به‌عنوان یک روش پایدار و کارآمد برای کاهش آلودگی‌های محیطی تبدیل کرده است [۱].

۴-۳. زیست‌افزایی

زیست‌افزایی یکی از روش‌های نوآورانه و کارآمد در تصفیه آلاینده‌های زیستی است که به‌خصوص در شرایطی که میکروبیولوژی طبیعی کفایت نمی‌کند، به‌کار می‌رود. در این فرآیند، میکروارگانیسم‌های تخصصی با توانایی تجزیه آلاینده‌های هدف به محیط‌های آلوده اضافه می‌شوند تا به تجزیه و کاهش میزان آلودگی کمک کنند. فرآیند زیست‌افزایی شامل جمع‌آوری مهار میکروب‌ها از مکان‌های مختلف، به‌ویژه از محل آلودگی (میکروب‌های بومی) است. این میکروارگانیسم‌ها سپس بهینه‌سازی می‌شوند و اندازه تلقیح، محیط کشت و شرایط مهندسی ژنتیک آنها تنظیم می‌شود. به‌علاوه، استراتژی‌هایی نظیر تحریک زیستی و گیاه‌پالایی برای افزایش کارایی کلی فرآیند اجرا می‌شود [۱۰]. عوامل مختلفی نظیر دما، ترکیب آلاینده‌ها و میزان تلقیح میکروبی بر کارایی زیست‌افزایی تأثیرگذار هستند که لازم است برای حداکثر کارایی این فرآیند کنترل شوند. میکروب‌ها در این سیستم به‌عنوان بیوکاتالیست عمل کرده و آلاینده‌ها را به مواد کم‌ضررتر تبدیل می‌کنند [۲۱]. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در این روش، حفظ بقای میکروب‌های دخیل در پاکسازی برای مدت زمان طولانی در محیط‌های بسیار سمی است. یک رویکرد منطقی برای مقابله با این مشکل، افزودن کنسرسیون‌های میکروبی مقاوم در برابر سرما به سیستم تصفیه است. این میکروارگانیسم‌ها می‌توانند به بهبود کیفیت نامطلوب پساب و عملکرد ناپایدار سیستم‌های تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کمک کنند [۴۵].

زیست‌افزایی به‌طور خاص در بازیابی سیستم‌های تصفیه‌ای که به‌طور معمول دچار مشکل شده‌اند، مؤثر است. در این روش، میکروارگانیسم‌های برتر (کشت‌های خالص یا کنسرسیون‌های مخلوط) از محیط‌های مختلف یا سویه‌های کارآمد به‌دست‌آمده از طریق مهندسی ژنتیک انتخاب می‌شوند تا توانایی تجزیه مولکول‌های مقاوم را در یک محیط آلوده بهبود دهند. با این حال، موفقیت یا عدم موفقیت زیست‌افزایی به عوامل محیطی و بیولوژیکی مختلفی بستگی دارد، مانند دما، تداخل میکروب‌های بومی و مقدار زیست‌افزایی، که همگی بر روی فعالیت میکروب‌ها تأثیرگذار هستند. یافته‌های متعدد نشان داده‌اند



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

که استفاده از مخلوط‌های خاصی از میکروارگانیسم‌ها، به ویژه کنسرسیوم‌های میکروبی با مسیرهای متابولیکی حیاتی و ظرفیت‌های تغذیه‌ای گسترده‌تر، می‌تواند به‌طور شایان توجهی در تضمین موفقیت‌ها و بهبود کارایی زیست‌افزایشی مؤثر باشد. این روش باعث افزایش سطح فعالیت میکروبی در محیط تصفیه‌شده و کاهش آلودگی در خاک و آب‌های زیرزمینی می‌شود. بنابراین، زیست‌افزایشی یک راهکار امیدوارکننده برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی در عصر حاضر محسوب می‌شود [۳۸].

۳-۴. فرآیندهای بیولوژیکی بی‌هوازی

فرآیند هضم بی‌هوازی (AD) یکی از بهینه‌ترین روش‌ها برای بازیابی انرژی و تصفیه فاضلاب‌های صنعتی است و به‌ویژه در صنایعی که موجب افزایش سطح نیتروژن در منابع آبی می‌شوند، همچون دباغی‌ها، پتروشیمی‌ها و داروسازی، اهمیت فراوانی دارد [۱۳]. این فرآیند به‌طور گسترده‌ای برای تثبیت لجن‌های مازاد تولید شده از فرآیندهای لجن فعال استفاده می‌شود و به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها در تصفیه لجن‌های فاضلاب و پسماندهای آلی شناخته می‌شود [۲۹]. با توجه به پتانسیل هضم بی‌هوازی در ارائه انرژی پاک و پایدار، این فناوری باید به‌عنوان یک گزینه کلیدی در مدیریت آلودگی و منابع آبی در نظر گرفته شود. در این فرآیند، باکتری‌ها مواد آلی را در غیاب اکسیژن به مخلوط گازی از جمله متان، دی‌اکسید کربن، هیدروژن و گوگرد هیدروژن تجزیه می‌کنند. از آنجا که برخی از گروه‌های باکتری‌های موجود در این فرآیند نمی‌توانند در حضور اکسیژن زنده بمانند، ایجاد یک محیط بی‌هوازی برای این فرآیند ضروری است [۴۱]. فرآیند هضم بی‌هوازی معمولاً در مخازن بسته انجام می‌شود و بیوگاز تولید شده به محل‌های ذخیره‌سازی موقت منتقل و در نهایت برای تولید گرما و برق در تسهیلات تولید همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند دارای مزایای بزرگی است؛ یکی از مهم‌ترین آن‌ها تولید بیوگاز است که می‌تواند به‌عنوان منبعی غنی از انرژی مورد استفاده قرار گیرد. بیوگاز نه تنها باعث کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی می‌شود، بلکه به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کمک می‌کند. هضم بی‌هوازی همچنین به کاهش حجم لجن منجر می‌شود و باعث تسهیل فرآیندهای تصفیه بعدی می‌گردد. به این ترتیب، استفاده از این نوع هاضم‌ها می‌تواند به تعادل اقتصادی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کمک کند (مصرزاده و همکاران، ۱۴۰۳). همچنین هاضم‌های بی‌هوازی با نرخ بالا، به‌ویژه در تصفیه فاضلاب، طراحی شده‌اند تا در زمان‌های کوتاه ماند هیدرولیکی عمل کنند و توانایی نگهداری مقادیر زیادی زیست‌توده را دارند. این نوع هاضم‌ها ظرفیت بارگذاری را افزایش می‌دهند و به بهبود تثبیت لجن کمک می‌کنند [۱۹].

به رغم مزایای قابل توجه، هضم بی‌هوازی نیز با چالش‌هایی مواجه است. یکی از معایب اصلی این فرآیند، زمان طولانی تجزیه مواد آلی است. این زمان می‌تواند به چند هفته برسد و ممکن است تأثیر قابل توجهی بر کارایی سیستم‌های تصفیه آب بگذارد. همچنین، فرآیند هضم بی‌هوازی نیاز به کنترل دقیق شرایط فرآیند دارد، از جمله دما و pH، تا بازده مطلوبی از تخمیر حاصل شود. در نهایت، تولید بوی نامطبوع ناشی از گازهای حاصل خود می‌تواند مشکلی برای محیط اطراف باشد [۲۶].

در مطالعات صورت گرفته، تکنیک‌های نوین تصفیه آب و فاضلاب، به‌ویژه فناوری‌های زیستی، به‌عنوان راه‌حل‌هایی مؤثر و پایدار برای بهبود کیفیت آب و کاهش آلودگی محیط‌زیست شناسایی شده‌اند. این فناوری‌ها، شامل بیوراکتورهای غشایی (MBR)، گیاه‌پالایی، تصفیه بیولوژیکی با جلبک‌ها و زیست‌افزایشی، هر یک دارای ویژگی‌ها و مزایای خاص خود هستند که می‌توانند در شرایط متفاوت به کار گرفته شوند. در مجموع، فناوری‌های زیستی نه تنها به بهبود کیفی پساب‌ها کمک می‌کنند، بلکه در حفاظت از محیط‌زیست نیز نقش سقوی دارند. با این حال، هر یک از این روش‌ها با چالش‌ها و محدودیت‌های خاصی از جمله هزینه، نیاز به فضای مناسب و انطباق با شرایط محیطی مواجه هستند. برای کسب بهترین نتایج، شناسایی و درک این چالش‌ها و نقاط قوت، نیاز به یک رویکرد جامع و هماهنگ دارد. جدول زیر خلاصه‌ای از این فناوری‌ها و ویژگی‌های کلیدی آن‌ها را ارائه می‌دهد.



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

جدول ۱: خلاصه‌ای از فناوری‌ها نوین زیستی تصفیه آب و فاضلاب و ویژگی‌های کلیدی آنها

منابع	چالش‌ها و محدودیت‌ها	سازگاری با محیط زیست	پتانسیل کاهش آلاینده‌ها	عملکرد تصفیه	روش تصفیه
[۱۱-۱۵].	هزینه‌های نصب و بهره‌برداری بالا؛ مشکل گرفتگی غشاهای	اثرات مثبت بر کیفیت آب و کاهش آلاینده‌ها	توانایی مناسب در کاهش آلاینده‌ها (نیتروژن و فسفر)	راندمان بالا در حذف کدورت، BOD و مواد معلق؛ کیفیت بالای پساب	بیوراکتورهای غشایی
[۳-۲۳].	نیاز به فضای وسیع؛ زمان طولانی برای تحقق نتایج	روشی پایدار و دوستدار محیط زیست؛ بهبود تنوع زیستی	قابلیت جذب و تثبیت آلاینده‌ها (فلزات سنگین، مواد آلی)	کاهش آلاینده‌های خاک و آب؛ بهبود کیفیت خاک	گیاه‌پالایی
[۵-۱]	نیاز به نور و شرایط خاص؛ ارائه مزایای پایین در دماهای پایین	گیاه‌پالایی با مزایای دوگانه؛ تولید اکسیژن و بهبود اکوسیستم‌های آبی	جذب آلاینده‌ها و کنترل مواد زائد (نیتروژن و فسفر)	کاهش غلظت مواد مغذی در پساب و تولید زیست توده	تصفیه بیولوژیکی با جلبک‌ها
[۴۵]	نیاز به حفظ شرایط بهینه (دما و pH)؛ بوی نامطبوع در برخی موارد	بافت عمده تخریب‌کننده‌های آلاینده؛ کمک به بازیابی زیست محیطی	افزایش نرخ تجزیه آلاینده‌ها در شرایط ناکافی	بهبود کارایی تخریب آلاینده‌ها در سیستم‌های بیولوژیکی	زیست‌افزایی
[۱۹-۲۶]	زمان طولانی برای تجزیه؛ نیاز به کنترل دقیق شرایط (دما و pH)	تولید انرژی؛ تجدیدپذیر؛ کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی	توانایی قابل توجه در تجزیه مواد آلی و هم‌زمان حذف آلاینده‌ها	بازیابی انرژی از لجن؛ تولید بیوگاز؛ کاهش حجم لجن	فرآیندهای بی‌هوازی

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در دنیای امروز، مسئله آب و فاضلاب به‌عنوان یک چالش اساسی، نیازمند رویکردهای نوآورانه و پایدار است. فناوری‌های نوین تصفیه، به‌ویژه فناوری‌های زیستی، نقش کلیدی در کاهش آلودگی زیست‌محیطی، بهینه‌سازی مدیریت منابع و دستیابی به توسعه پایدار ایفا می‌کنند [۲۷].

یکی از مهم‌ترین مزایای این فناوری‌ها، بهبود کیفیت آب است. روش‌هایی نظیر بیوراکتورهای غشایی (MBR)، گیاه‌پالایی و تصفیه با جلبک، به طور مؤثری آلاینده‌ها را کاهش داده و کیفیت آب را برای مصارف گوناگون ارتقا می‌بخشند. این امر، علاوه بر تأثیر مستقیم بر سلامت عمومی و اکوسیستم‌ها، در تأمین آب برای کشاورزی، صنعت و مصارف خانگی نیز مؤثر است [۴۲]. علاوه بر این، این روش‌ها به طور هم‌زمان به کاهش آلودگی آب و خاک کمک می‌کنند. برای مثال، در گیاه‌پالایی، آلاینده‌های موجود در خاک و آب به طور طبیعی جذب شده و به ترمیم اکوسیستم‌های آسیب‌دیده کمک می‌شود. این رویکرد، به‌ویژه در مناطق آلوده و صنعتی، اهمیت ویژه‌ای دارد و منجر به بهبود کیفیت منابع طبیعی می‌گردد [۱۷].



تصفیه بیولوژیکی با جلبک‌ها نیز، از طریق کاهش دی‌اکسید کربن و تولید اکسیژن، به حفظ تعادل اکوسیستمی و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی کمک می‌کند [۱۸]. همچنین، استفاده از بیوراکتورهای غشایی در حفاظت از منابع آبی و جلوگیری از آلودگی آن‌ها نقش بسزایی دارد [۱۱].

در زمینه بهینه‌سازی منابع طبیعی، تکنیک‌های تصفیه بیولوژیکی امکان بازیابی مواد مغذی از پساب‌ها و تبدیل آن‌ها به کودهای آلی را فراهم می‌آورند. استفاده مجدد از آب تصفیه‌شده نیز، فشار بر منابع آب شیرین را کاهش داده و به مدیریت بهینه منابع طبیعی کمک می‌کند.

فناوری‌های زیستی، با ترویج روش‌های طبیعی و پایدار، به حفظ و افزایش تنوع زیستی نیز کمک می‌کنند. گیاه‌پالایی، به عنوان یک روش طبیعی و مؤثر، می‌تواند به ترمیم اکوسیستم‌های تخریب‌شده و حفظ گونه‌های گیاهی و جانوری کمک نماید [۲۵].

با این حال، دستیابی به نتایج مطلوب در تصفیه آب و فاضلاب با چالش‌هایی نظیر سرمایه‌گذاری‌های اولیه بالا، نیاز به آموزش و آگاهی عمومی و ناپایداری در شرایط محیطی همراه است. برای غلبه بر این چالش‌ها، سیاست‌گذاران باید به توسعه زیرساخت‌ها، حمایت از پژوهش‌ها و ترویج همکاری‌های بین‌المللی توجه ویژه‌ای داشته باشند.

در نتیجه، روش‌های نوین زیستی تصفیه آب و فاضلاب، از جمله بیوراکتورهای غشایی (MBR)، گیاه‌پالایی، تصفیه با جلبک و زیست‌افزایشی، پتانسیل بالایی برای بهبود عملکرد تصفیه و کاهش مشکلات زیست‌محیطی دارند. برای دستیابی به این هدف، توصیه می‌شود که سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه افزایش یابد، زیرساخت‌های پایدار توسعه داده شوند، آگاهی عمومی و آموزش ترویج گردد، همکاری‌های بین‌المللی تشویق شوند و چارچوب‌های قانونی و مشوق‌های مناسب ایجاد گردند.

در نهایت، بهره‌گیری از روش‌های نوین تصفیه آب و فاضلاب، با حمایت‌های فراگیر از سوی دولت‌ها، نهادهای علمی و صنعتی، می‌تواند به بهینه‌سازی محیط‌زیست، کاهش آلودگی و بهبود کیفیت منابع آبی منجر شده و ما را به سوی آینده‌ای پایدارتر هدایت کند.

مراجع

1. Abdel-Kareem, M, Fathy, A. (2025). Bioremediation and Wastewater Treatment Using Algae: A Review, *Egyptian Journal of Phycology*, 26 (1): 21-34.
2. Abedi-Koupai, J, Hakimian, M. H, Motamedi, A. (2023). Effectiveness of Vetiver system in improving biological characteristics and electrical conductivity of wastewater, *Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 45 (4):87-100. (In Farsi).
3. Afiqah Buslima, F, Hasan, H, Sheikh Abdullah, S, Othman, A.R. (2024). Water recovery from domestic wastewater using integrated biofilm-phytoremediation technology: A review, *Journal of Water Process Engineering*, 65: 105875.
4. Agrawal, R, Agrawal, S, Samadhiya, A, Kumar, A, Luthra, S, Jain, V. (2024). Adoption of green nance and green innovation for achieving circularity: An exploratory review and future directions, *Geosci. Front*, 15(4), 101669.
5. Akbar, S. A, Khairunnisa, K. (2024). Seaweed-based biosorbent for the removal of organic and inorganic contaminants from water: a systema@c review, *BIO Web of Conferences*, 87: 02011.
6. Aslam, RW, Shu, H, Naz, I, Quddoos, A, Yaseen, A, Gulshad, K, Alarifi, SS. (2024). Machine learning-based wetland vulnerability assessment in the sindh province Ramsar site using remote sensing data, *Remote Sens*, 16:928-957.
7. Bashir, K, Khan, S, Ali, R, Yasmin, H, Gaafar, A.-R. Z, Khilgee, F. E. A, BuM, S, Ullah, A. (2023). Bioremediaon of metal-polluted industrial wastewater with algal-bacterial consora: A sustainable strategy. *Sustainability*, 15(19): 14056



8. Bera, S.P, Godhaniya, M, Kothari, C, Emerging and advanced membrane technology for wastewater treatment: a review, Journal of Basic Microbiology, ۶۲, (۲۰۲۲), pp ۲۴۵-۲۵۹.
9. Chen, X, Cai, L. (2021). Study on the effect of membrane active surface orientation in OMBR on norfloxacin wastewater treatment, International Journal of Chemical Engineering and Applications, 12 (4) : 26-29,
10. Chettri, D, Verma, A.K, Verma, A.K. (2024). Bioaugmentation: an approach to biological treatment of pollutants, Biodegradation ۳۵, ۱۱۷-۱۳۵.
11. Chimuca, J.F, Andrade do Canto, C.S, Tavares de Sousa, J, Duarte Leite, V, Silva Lopes, W. (2023). Anaerobic dynamic membrane bioreactor applied to wastewater treatment: a review, Afinidad, Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry, 80 (598) : 19-34.
12. Chugh, M, Kumar, L, Shah, M. P, Bharadvaja, N. (2022). Algal Bioremediation of heavy metals: An insight into removal mechanisms, recovery of by-products, challenges, and future opportunities. Energy Nexus, 7: 589-602.
13. Deng, Z, Sun, Ch, Ma, G, Zhang, X, Guo, H, Zhang, T, Zhang, Y, Hu, Y, Li, D, Li, Y, Kong, Z. (2025). Anaerobic treatment of nitrogenous industrial organic wastewater by carbon-neutral processes integrated with anaerobic digestion and partial nitrification/anammox: Critical review of current advances and future directions, Bioresource Technology, 415, , 131648
14. Dey, P, Mishra, A, Malik, A. (2020). Mechanistic insight to mycoremediation potential of a metal resistant fungal strain for removal of hazardous metals from multimetal pesticide matrix Environ, Pollut, 262, 114255.
15. Emmanuel Jijingi , H, Kazemi Yazdi, S, Abdalla Abakar , Y, Etim , E. (2024). Evaluation of membrane bioreactor (MBR) technology for industrial wastewater treatment and its application in developing countries: A review, Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, ۱۰ : ۱۰۰۲-۹۸۲.
16. Ethiraj, S, Samuel, M. S, Indumathi, S. (2024). A comprehensive review of the challenges and opportunities in microalgae-based wastewater treatment for eliminating organic, inorganic, and emerging pollutants, Biocatal. Agric. Biotechnol, 103316.
17. Faramarzi, S., Ahmari, H., Manzeh Hajiyar, M. (2015). Phytoremediation in Wastewater Treatment, Fourth National Conference on New Chemical Technologies and Chemical Engineering, Quchan, 1-10. (In Farsi).
18. Farid, N, Ullah, A, Khan, S, BuM, S, Khan, A. Z, Afsheen, Z, El-Serehy, H. A, Yasmin, H, Ayaz, T, Ali, Q. (2023). Algae and hydrophytes as potential plants for bioremediation of heavy metals from industrial wastewater, Water, 15(12): 2142
19. Gunes, B, Stokes, J, Davis, P, Connolly, C, Lawler, J. (2019). Pre-treatments to enhance biogas yield and quality from anaerobic digestion of whiskey distillery and brewery wastes: a review, Renew. Sustain. Energy Rev, 113, 109281
20. Hafz, M. A, Hawari A. H, Altaee, A. A. (2019). hybrid forward osmosis/reverse osmosis process for the supply of fertilizing solution from treated wastewater, J. Water Proc. Eng, 32: 458-467.
21. Ilango, V, Sridharan, K. (2025). Chapter 17 - Bioaugmentation for heavy metal treatment present in wastewater, Biotechnologies for Wastewater Treatment and Resource Recovery, 58: 227-240.



22. Kargar, F, Bemani, K, Sayadi, M.H, Ahmadpour, N. (2024). Antibiotics, release routes, and their novel removal approaches from the aquatic environments, *Water Resources Engineering*, 17 (60):27-52 (In Farsi).
23. Kasmuri, N, Malik, S.A, Yaacob, Z, Miskon, M, Ramli, N.H, Zaini, N. (2023). Application of Water Hyacinth in Phytoremediation of Wastewater, *International Conference on Civil and Environmental Engineering*, 1-12.
24. Khalid, M. Z, Jamil, A, Nawaz, M. S, Ghaffour, N. (2020). Assessment of Wastewater Quality of Paharang Drain and its Impact on the Ground Water Quality of Adjacent Areas: Assessment of Wastewater Quality of Paharang Drain and its Impact on the Ground Water Quality of Adjacent Areas. *International Journal of Economic and Environmental Geology*, 11(4): 6–13.
25. Kundu, D, Dutta, D, Joseph, A, Jana, A., Samanta, P, Bhakta, J. N. (2024). Safeguarding drinking water: A brief insight on characteristics, treatments and risk assessment of contamination, *Environ. Monit. Assess*, 196(2): 180-200.
26. Li, Z, Inoue, Z, Ike, M. (2023). Mitigating ammonia-inhibition in anaerobic digestion by bioaugmentation: A review, *Journal of Water Process Engineering*, 52, 103506
27. Modi, M. (2022). Sustainable development through water purification using modern methods, *International Conference on Modeling and New Technologies in Water Management*, 1-12 (In Farsi).
28. Moserzadeh, A A, Nabi Bidhendi, G, Mehrdadi, N, Amiri, M J. (2024). Investigating the effect of micro aerobic process on the efficiency of anaerobic digester of sulfate-rich municipal sewage sludge, 17 (1) :125-138 (In Farsi).
29. Mutegoa, E, Sahini, M. (2023). Approaches to mitigation of hydrogen sulfide during anaerobic digestion process – A review, *Heliyon*, 9, 1-18.
30. Pandey, V.C, Bajpai, O. (2019). Phytoremediation: From theory toward practice, *In Phytomanagement of Polluted Sites*, 258: 1–49.
31. Pervez, M.N, Balakrishnan, M, Hasan, S.W, Choo, K.H, Zhao, Y, Cai, Y, Zarra, T, Belgiorio, V, Naddeo, V. (2020). A critical review of nanomaterials membrane bioreactor (NMS-MBR) for wastewater treatment, *Npj Clean Water*, 3, Nature Research .
32. Quddoes, A, Muhmood, K, Naz, I. (2024). Geospatial insights into groundwater contamination from urban and industrial effluents in Faisalabad, *Discov Water*, 4: 50 - 80.
33. Rahman, T. U, Roy, H, Islam, M. R, Tahmid, M, Fariha, A, Mazumder, A, Tasnim, N, Pervez, M. N, Cai, Y, Naddeo, V, Islam, M. S. (2023). The Advancement in Membrane Bioreactor (MBR) Technology toward Sustainable Industrial Wastewater Management. *Membranes*, 13(2), 181-201.
34. Rasool, Sh, Ahmad, I, Jamal, A, Farhan Saeed, M, Zakir, A, Abbas, G, Seleiman, M, Caballero-Calvo, A. (2023). Evaluation of Phytoremediation Potential of an Aquatic Macrophyte (*Eichhornia crassipes*) in Wastewater Treatment, *Sustainability*, 15(15): 11533.
35. Sangamner, R, Misra, T, Bherwani, H. (2023). A critical review of conventional and emerging wastewater treatment technologies, *Sustain. Water Resour. Manag*, 9: 58- 70.
36. Sarma, U, Hoque, M. E, Thekkangil, A, Venkatarayappa, N, Rajagopal, S. (2024). Microalgae in removing heavy metals from wastewater – An advanced green technology for urban wastewater treatment, *Journal of Hazardous Materials Advances*, 15, 100444



37. Shamshad, J, Rehman, R. (2025). Innovative approaches to sustainable wastewater treatment: a comprehensive exploration of conventional and emerging technologies, *Environ. Sci.: Adv*, 4: 189-222.
38. Shan, X, Guo, H, Ma, F, Shan, Z. (2023), Enhanced treatment of synthetic wastewater by bioaugmentation with a constructed consortium, *Chemosphere*, 388: 323-350.
39. Shiri, M, Hashemifard, S.A, Abdi, G. (2023). The potential of microalgae *Dunaliella salina* to treat shrimp pond wastewater in a PAN/GO membrane bioreactor *Chemosphere, Environmental Science, Materials Science, Engineering*, 318,138001
40. Tariq, A, Mumtaz, F. A. (2023). Series of Spatio-temporal analyses and predicting modeling of land use and land cover changes using an integrated markov chain and cellular automata models, *Environ Sci Pollut Res*, 54, 258-274.
41. Uddin, M, Wright, M. (202۲). Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances, *Physical Sciences Reviews*,8 (9): 2819-2837.
42. Ulusoy, A, Atılgan, A, Rolbiecki, R, Jagosz, B, Rolbiecki, S. (2024). Innovative Approaches for Sustainable Wastewater Resource Management, *Agriculture*, 14(12): 2111.
43. UNEP. (2021). Water Pollution: A Global Crisis.
44. Wang, N, Naz, I, Aslam, R.W, Quddoos, A, Soufan, W, Raza, D, Ishaq, T, Ahmed, B. (2024). spatio-temporal dynamics of rangeland transformation using machine learning algorithms and remote sensing data. *Rangel Ecol Manag*,94:106–18.
45. Xu, G, Ng, H.I, Chen, C, Zhao, S, He, J. (2022). Efficient and complete detoxification of polybrominated diphenyl ethers in sediments achieved by bioaugmentation with dehalococcoides and microbial ecological insights, *Environ. Sci. Technol.* 56: 8008–8019
46. Zhou, Y, Zhu, Y, Zhu, J, Li, C, Chen, G. (2023). A comprehensive review on wastewater nitrogen removal and its recovery processes, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20: 547-569.