Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

# Utilizing periphyton as an innovative biotechnology in pollutants removal

**Kamyar Amirhosseini**[1]✉ | **Hossein Ali Alikhani**[2]
1. Corresponding Author, Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: amirhosseini.k@ut.ac.ir
2. Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: halikhan@ut.ac.ir

## Article Info

**Article type:** Review Article

**Article history:**

**Received:** Oct. 1, 2023

**Revised:** Nov. 20, 2023

**Accepted:** Dec. 5, 2023

**Published online:** Feb. 20, 2024

**Keywords**:
Biofilm,
Bioremediation,
Decontamination,
Environmental Pollution,
Periphyton.

## ABSTRACT

Periphyton is a complex biological community comprising microorganisms and organisms from different physiological groups that collectively attach to various submerged surfaces in wetland ecosystems. Periphytic biofilms play a critical role in the wetland ecosystem's dynamicity and possess a considerable capacity for decontamination. The following article examines the various aspects of periphytic biofilms' capacity for removing some of the most critical environmental pollutants, including organic pollutants, pharmaceuticals, heavy metals, microplastics, and excess nutrients. The paper provides comprehensive discussions on the critical pollutant removal mechanisms employed by the periphytic communities. Additionally, the paper endeavors to contribute to the available knowledge regarding utilizing and developing periphyton-derived bioremediation technologies by presenting the most recent research findings, discussing common challenges in periphyton's biotechnological application, and delineating crucial research gaps to postulate future research questions. Applying periphyton in pollutant removal aligns with the most recent paradigm of bioremediation technologies advocating the use of microbial consortia instead of single microbial species. In this regard, research results convey that the simultaneous presence of multiple microbial groups together in a biological community (such as periphyton) increases the microorganisms' resistance to unfavorable environmental conditions and enhances the biological community's capacity for decontamination. Based on the studies presented in this article, periphytic biological communities can employ different mechanisms to transform and biodegrade a wide array of pollutants.

Cite this article: Amirhosseini, K., & Alikhani, H. A. (2024) Utilizing Periphyton as an Innovative Biotechnology in Pollutants Removal, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (12), 1821-1842. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.366061.669585
© The Author(s).
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.366061.669585

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۴، شماره ۱۲ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

# کاربرد پریفایتون به عنوان فناوری زیستی نوآورانه در حذف آلاینده‌ها

کامیار امیرحسینی[1]✉ | حسینعلی علیخانی[2]

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: amirhosseini.k@ut.ac.ir
۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج ، ایران. رایانامه: halikhan@ut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:** مقالهٔ مروری

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۲/۷/۹
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۲/۸/۲۹
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۲/۹/۱۴
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۲/۱۲/۱

**واژه‌های کلیدی:**
آلاینده‌زدایی،
آلودگی محیط زیست،
بیوفیلم،
پریفایتون،
زیست‌پالایی.

**چکیده**

پریفایتون، جامعه زیستی پیچیده‌ای مشتمل بر ریزجانداران و موجودات زنده مختلف و متعلق به گروه‌های فیزیولوژیک مختلف است که به انواع بسترهای معلق در بوم‌سازگان‌های غرقاب متصل می‌شود. لایه‌های زیستی پریفایتیک، نقشی کلیدی در پویایی بوم‌سازگان‌های غرقاب ایفا می‌نمایند و از ظرفیت قابل توجهی در آلاینده‌زدایی برخوردارند. در مقاله پیش رو، جوانب مختلف مربوط به قابلیت‌های بیوفیلم‌های پریفایتیک در حذف برخی از کلیدی‌ترین آلاینده های زیست محیطی، همچون آلاینده‌های آلی و داروهای شیمیایی، فلزات سنگین، میکروپلاستیک‌ها و نیز عناصر غذایی، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، سازوکارهای مختلف بکار گرفته شده توسط جوامع پریفایتیک برای حذف آلاینده‌های مختلف، به شیوه‌ای منسجم ارایه شده است. مطالعه مروری حاضر سعی دارد تا با ارایه یافته‌های پژوهش‌های اخیر در قالب محتوای علمی و کاربردی، تشریح چالش‌های متداول در استفاده زیست فناورانه از پریفایتون و نیز ارایه برخی از مهم‌ترین محورهای پژوهشی برای تحقیقات آینده، در راستای افزایش دانش پیرامون بهره‌وری و نیز توسعه فنون نوین زیست‌پالایی مبتنی بر پریفایتون مثمر ثمر واقع شود. کاربرد پریفایتون به منظور حذف آلاینده‌ها، در راستای تازه‌ترین جهت‌گیری‌ها در گفتمان‌های مربوط به فناوری‌های زیست‌پالایی پیرامون بهره‌مندی از ظرفیت‌های کنسرسیوم‌های میکروبی در مقابل استفاده از سویه‌های میکروبی منفرد قرار دارد. در این مقوله، نتایج بدست آمده از پژوهش‌ها نشان داده است که حضور توأم چندین گروه میکربی در یک جامعه زیستی مانند پریفایتون، با افزایش مقاومت ریزجانداران در برابر انواع شرایط محیطی نامساعد و نیز افزایش ظرفیت آلاینده زدایی در جامعه زیستی همراه است. بر اساس مطالعات ارایه شده در این مقاله، جوامع زیستی پریفایتیک قادر هستند تا از طریق سازوکارهای مختلف، نسبت به تغییر و تبدیل و نیز تجزیه زیستی دامنه گسترده‌ای از آلاینده‌ها عمل کنند.

استناد: امیرحسینی، کامیار؛ علیخانی، حسینعلی. (۱۴۰۲). کاربرد پریفایتون به عنوان فناوری زیستی نوآورانه در حذف آلاینده‌ها *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۱۲)، ۱۸۲۱-۱۸۴۲. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.366061.669585

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.366061.669585

## مقدمه

آلاینده‌های زیست محیطی از جمله چالش‌های اساسیِ انسان معاصر و میراث قرن‌ها فعالیت صنعتی و کشاورزی متراکم است (DeLorenzo, 2018). علی‌رغم آنکه برخی از آلاینده‌ها (مانند فلزات سنگین) برای مدت‌های طولانی و نسبتا مستقل از فعالیت انسان در محیط وجود داشتند، توسعه حمل و نقل و نیز امکان تولید انبوه ترکیبات شیمیایی مختلف در عصر حاضر، باعث ورود ترکیبات بیگانه با سامانه‌های زنده[1] به محیط زیست و نیز تحرک و بازتوزیع کربن محصور در سوخت‌های فسیلی شده است (Alexander, 1999). امروزه، طیف وسیعی از آلاینده‌های پایدار و مقاوم به تجزیه، در تمامی بوم‌سازگان‌های زمین یافت می‌شوند (DeLorenzo, 2018). در این مقوله، فناوری‌ها و روش‌های متعددی برای حذف کامل آلایندها از محیط (از طریق معدنی‌سازی[2]) یا تبدیل آنها به ترکیباتی با سمیت کمتر[3] (به مفهوم کاهش آلودگی) ارایه شده‌اند. این روش‌ها، در ویژگی‌هایی همچون کارایی، هزینه، سازگاری با محیط زیست و نیز پایداری، با یکدیگر متفاوت هستند. در این راستا، انجام پژوهش‌های علمیِ بنیادی و با کیفیت، امکان مقایسه اثرگذاری رویکردهای مختلف و نیز ارایه راه حل‌های مناسب برای چالش آلودگی محیط زیست و پالایش موثر آلاینده‌های زیست محیطی را فراهم می‌سازد (Steffan, 2019).

مطالعات علمیِ مربوط به تجزیه زیستیِ[4] آلاینده‌های محیطی، به افزایش آگاهی و نیز تولید دانش پیرامون چگونگی کاتابولیسم یا فروگشت آلاینده‌های پایدار توسط ریزجانداران می‌پردازد. هم‌سو با پیشرفت‌های علمی و پژوهشی در این زمینه، فناوری پالایش زیستی[5]، امکان استفاده از سیستم‌های زنده برای حذف یا کاهش میزان آلاینده‌ها در مکان‌های آلوده را فراهم می‌آورد. اولین تلاش‌ها برای بهره‌مندی از ظرفیت ریزجانداران در پالایش آلاینده‌ها، به پژوهش‌های صورت گرفته توسط Gunsalus et al., (1953) و نیز Conrad et al., (1965) بازمی‌گردد، که به ترتیب، از باکتری‌های جداسازی شده از محیط برای تغییر و تبدیل ترکیبات آروماتیک و نیز تِرپِنوئیدها استفاده نمودند. پس از ارایه این دستاوردها در دهه ۵۰ میلادی، ظرفیت عظیم ریزجانداران برای مدیریت آلاینده‌های محیطی، عنوان جایگزینی مناسب، کم‌هزینه و نیز دوستدار محیط زیست جهت پالایش کارآمد مکان‌های آلوده، مورد توجه محققین قرار گرفت.

فناوری‌های زیست‌پالایی، تاکنون، سه مرحله اصلی از تحولات را در سیر تکاملی خود پشت سر گذاشته است. این مراحلِ تکاملی، که نسل ۱ تا ۳[6] نامگذاری شده‌اند، شامل: (۱) تحقیقات اولیه در زمینه تجزیه زیستی و زیست‌پالایی با توجه به تمام جوانب مربوط به یک مکان آلوده اعم از ویژگی‌های فیزیکی–شیمیایی و زمین‌شناختی، بوم‌شناسی، پویایی جوامع زیستی بومی و قابلیت کاتالیزوری ریزجانداران، (۲) کاربرد فناوری DNA نوترکیب و شیوه‌های اصلاح ژنتیک به منظور بهبود ظرفیت آلاینده‌زدایی در ریزجانداران و نیز (۳) توسعه بین‌رشته‌ای علوم فناوری اطلاعات و زیست‌شناسی سامانه‌ها همراه با گردآوری حجم بالایی از داده‌های اومیکس است. در گفتمان‌های نسل سوم زیست‌پالایی، اهمیت توجه به کنسرسیوم‌های میکروبی در مقابل تکیه یک جانبه بر سویه‌های منفرد، مورد تاکید قرار گرفته است. در این خصوص، کلیدی‌ترین مزیت کاربرد کنسرسیوم‌های میکروبی در پروژه‌های زیست‌پالایی در مقایسه با استفاده از سویه‌های منفرد، به خصوصیات منحصر به فرد جوامع میکروبی، مانند توزیع فرایندهای متابولیک و اشتراک‌گذاری مسیرهای بیوشیمیایی میان اجزای سازنده کنسرسیوم‌ها نسبت داده می‌شود. بر اساس نتایج بدست آمده در پژوهش‌ها، وجود این دسته از ویژگی‌ها در کنسرسیوم‌های میکروبی، با افزایش قابلیت تجزیه‌کنندگی و آلاینده‌زدایی توسط جامعه زیستی همراه است (DeLorenzo, 2018).

پریفایتون، به کنسرسیوم پیچیده‌ای از ریزجانداران و موجودات زنده، شامل جلبک‌ها، باکتری‌ها، قارچ‌ها، پروتوزوئرها، متازوآ و نیز بقایای آلی و معدنی گفته می‌شود که در بوم‌سازگان‌های غرقاب، به انواع بسترهای زنده، غیر زنده، آلی و یا غیر آلی، متصل می‌شود (Wu, 2016). پریفایتون، از طریق شرکت در جابجایی و انتقال عناصر غذایی، معدنی‌سازی مجدد و افزایش جذب عناصر غذایی، تنظیم شار عناصر غذایی[7]، شرکت در چرخه‌های عناصر غذایی، شرکت در تولیدات اولیه اکوسیستم‌های آبی، افزایش تنوع زیستی و نیز فراهم‌آوری مکان‌های مناسب جهت انجام انواع فعالیت‌های بیوژئوشیمیایی، نقش بسزایی را در حفظ تعادل اکولوژیک و نیز بهبود قابلیت تولید در بوم‌سازگان‌های آبی و غرقاب ایفا می‌نماید. بیوفیلم‌های پریفایتیک، به عنوان مخازن موقت عناصر غذایی و انرژی، بخش جدایی‌ناپذیری

1. Xenobiotic
2. Mineralization
3. Mitigation
4. Biodegradation
5. Bioremediation
6. Bioremediation 1.0, 2.0, and 3.0
7. Regulation of nutrient flux

از این بوم‌سازگان‌ها محسوب می‌شوند (علیخانی و همکاران، ۱۴۰۰).

تنوع زیستی قابل توجه و حضور توأم گروه‌های فیزیولوژیک مختلف در جامعه پریفایتیک، باعث بروز ویژگی‌های منحصر به فرد مانند هم‌پوشانی عملکردی[1] و متابولیسم اِکتوپیک[2] در این جوامع می‌گردد، که امکان تحمل شرایط تنشی و نیز قابلیت استفاده از دامنه گسترده‌ای از سوبسترا را برای پریفایتون فراهم می‌سازد. این خصوصیات، پریفایتون را به ابزاری کارآمد برای استفاده در فناوری‌های زیست‌پالایی تبدیل می‌سازد. در این رابطه، نتایج بدست آمده از پژوهش‌ها، حاکی از ظرفیت قابل توجه این جامعه زیستی در حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها بوده است (Faheem et al., 2020a). در مطالعه مروری پیش رو، جوانب مختلف مربوط به توانایی بیوفیلم‌های پریفایتیک در حذف آلاینده‌هایی نظیر آلاینده‌های آلی و داروهای شیمیایی، فلزات سنگین، میکروپلاستیک‌ها و نیز عناصر غذایی، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. افزون بر آن، چالش‌های متداول در استفاده زیست‌فناورانه از پریفایتون و نیز محورهای پژوهشی برای تحقیقات آینده ارایه شده است. مقاله حاضر، با ارایه تازه‌ترین جهت‌گیری‌ها در استفاده فناورانه از ظرفیت جوامع زیستی پریفایتیک در پالایش آلاینده‌های زیست محیطی، در افزایش دانش، بهره‌وری و نیز توسعه فنون نوین زیست‌پالایی مثمر ثمر خواهد بود.

## رویکردهای مختلف در آلاینده‌زدایی

### تعریف آلودگی

گسترش جوامع بشری و افزایش تراکم فعالیت‌های صنعتی، فشارهای وارده بر منابع طبیعی را تشدید بخشیده است. امروزه، منابع مختلف، مانند آب و خاک، تحت تاثیر توأم تغییرات ناشی از فرایندهای طبیعی و نیز فعالیت‌های انسانی قرار گرفته‌اند. شدت بالای دگرگونی در سازوکارها و فرایندهای طبیعیِ زمین، که تحت تاثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی قرار دارند، موجب نام‌گذاریِ عصر زمین‌شناسیِ حاضر تحت عنوان آنتروپوسن[3] گردیده است (Lewis and maslin 2015). در این راستا، مسائل مربوط به آلودگی خاک و آب، به عنوان یکی از چالش‌های اساسی در ادبیاتِ علمی مربوطه معرفی می‌شوند. بر اساس تعریف ارایه شده توسط سازمان خواربار و کشاورزی سازمان ملل متحد (FAO)[4]، «آلودگی» به حضور یک عنصر یا ماده شیمیایی در خارج از مکانِ معمول خود و یا وجود آن در غلظتی بالاتر از حد معمول در محیط، که با اثرات مخرب بر موجودات زنده همراه است، اطلاق می‌شود. در این خصوص، دشواری در ارزیابی مستقیم و نیز چالش‌ها در پایش اغلب آلاینده‌ها در محیط، وجود آلودگی در منابعی همچون خاک را به خطری پنهان تبدیل ساخته است (rodriguez, 2018). حضور و تجمع آلاینده‌هایی نظیر فلزات سنگین، ترکیبات آلی پایدار، ترکیبات نفتی، داروها و ترکیبات شیمیاییِ سمی، زباله‌های آرایشی-بهداشتی، نهاده‌های شیمیایی کشاورزی، پلیمرهای مصنوعی، میکروپلاستیک‌ها و نیز مقادیر بالای عناصر غذایی (Havugimana et al 2017)، کیفیت، سلامت و نیز خدمات بوم‌شناختی ارایه شده توسط بوم‌سازگان‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد (rodriguez, 2018). در عصر حاضر، ضروری است به منظور دستیابی به اهداف توسعه پایدار و تداوم فعالیت‌های انسانی، منابع تنش را با دقت شناسایی کنیم و در راستای افزایش دانش علمی پیرامون روش‌های کاربردی و موثر در رفع آنها قدم برداریم.

### روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی حذف آلاینده‌ها

رویکردهای متداول بکاررفته در حذف آلاینده‌ها از اجزای مختلف محیط زیست (مانند آب، رسوبات و خاک)، معمولا، با محدودیت‌های عملیاتی همراه است. از جمله راهکارهای کلی که به منظور مدیریت مکان‌های آلوده مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان به لایروبی[5]، دفن پسماند (خاک‌چال)[6] و نیز پالایش طبیعیِ کنترل شده[7] اشاره نمود (EPA,2005). روش‌های نامبرده، غالبا، با هزینه‌های اجرایی بالا همراه هستند و علی‌رغم آنکه میزان آلودگی در محل هدف را کاهش می‌دهند، ممکن است باعث انتقال آلودگی از محلی به محل دیگر شوند (Parelo, 2010). بنابراین، در این روش‌ها، آلاینده‌ها به طور کامل حذف نمی‌شوند (Cho et al 2009) و حتی ممکن است فرایند بکاررفته در انتقال آنها، موجب بازتوزیع آلاینده‌ها در محیط شود (Samuelsson 2012). در دهه‌های گذشته، توسعه سازوکارهای پیشرفته برای حذف اختصاصی آلاینده‌ها از محیط، امکان بهره‌مندی از روش‌های متنوع برای مدیریت بهینه آلاینده‌ها در مکان‌های آلوده را فراهم آورد.

---

1. Functional redundancy
2. Ectopic metabolism
3. Anthropocene
4. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)
5. Dredging
6. Capping landfills
7. Monitored natural remediation

جدول شماره ۱، فواید و معایت مربوط به کاربرد هر یک از روش‌های فیزیکی، شیمیایی و نیز زیستی در حذف آلاینده‌های مختلف را ارایه داده است. ضروری است با مطالعه و مقایسه ویژگی‌ها و خصوصیات روش‌های گوناگون، نسبت به گزینش مناسب‌ترین رویکرد برای مدیریت پایدار آلاینده‌ها در محیط زیست اقدام گردد.

**جدول شماره ۱- مقایسه رویکردها و روش‌های مختلف در حذف آلاینده‌های زیست محیطی**

| رویکرد | روش‌ها | آلاینده هدف | فواید | معایب | منبع |
|---|---|---|---|---|---|
| فیزیکی- شیمیایی | تبادل یونی[1]، هم‌آوری[2]، الکترودیالیز[3]، فیلتراسیون غشایی[4]، اسمز معکوس[5] و ترسیب[6] | فلزات سنگین | • راندمان بالا در حذف آلاینده‌ها<br>• مقیاس‌پذیری مناسب<br>• عملکرد سریع | • هزینه زیاد در مقیاس کلان<br>• امکان ایجاد آلودگی ثانویه<br>• مصرف زیاد انرژی<br>• عدم سازگاری با محیط زیست | Faheem et al. (2020a) |
| | تجزیه نوری[7]، جذب سطحی[8]، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته (با استفاده از اُزون)[9] و استخراج جُفت-یون[10] | آب‌های آلوده به آلاینده‌ها آلی | • راندمان بالا در حذف آلاینده‌ها<br>• تطبیق‌پذیری با دامنه گسترده-ای از آلاینده‌های آلی<br>• پالایش ترکیبات پیچیده | • عدم امکان استفاده در حجم زیاد<br>• هزینه‌های اجرایی زیاد<br>• احتمال تولید محصولات جانبی سرطان‌زا | Shabbir et al. (2018) |
| | احداث تالاب‌های مصنوعی[11]، مدیریت نواحی رودخانه‌ای[12] و روش‌های مدیریت بهینه زراعی | غلظت بیش از حد عناصر غذایی | • بهره‌مندی از فرایندهای طبیعی<br>• تحریک چرخه‌های عناصر غذایی<br>• هزینه کمتر نسبت به روش-های مبتنی بر فناوری | • عد موفقیت در حذف کامل عناصر<br>• احداث و مدیریت دشوار<br>• هزینه اجرایی زیاد<br>• اثرگذاری در مثبت مدت | Sutherland and craggs (2017) |
| | تسریع فرایند تجزیه در حضور نور مرئی[13]، استفاده از نانو فنرهای کربنی فعال[14]، کاربرد نانو ساختارهای سبز در تجزیه نوری[15] و تخریب حرارتی[16]. | میکروپلاستیک‌ها | • راندمان بالا در حذف آلاینده‌ها<br>• تطبیق‌پذیری با دامنه گسترده-ای پلیمرهای پلاستیکی<br>• دارای ظرفیت اتوماسیون<br>• امکان بازیابی منابع | • پیچیدگی فناوری و روش‌ها<br>• هزینه اجرایی زیاد<br>• مقیاس‌پذیری محدود<br>• اثرات بالقوه زیست محیطی | Shabbir et al. (2020) |
| زیستی | تولید کمپوست، استفاده از رآکتورهای زیستی[17]، فیلترهای زیستی، معرفی ریزجانداران با قابلیت رفع آلاینده‌ها[18] و تحریک تجزیه زیستی در محل آلوده از طریق اصلاح ویژگی‌های محیط[19] | حذف هدفمند آلاینده‌های گوناگون | • اقتصادی<br>• بهره‌مندی از فرایندهای طبیعی<br>• سازگار با محیط زیست<br>• پایدار | • زمان‌بر<br>• اثرپذیری از عوامل و شرایط محیطی<br>• نیازمند پایش و بهینه‌سازی<br>• مقیاس‌پذیری محدود<br>• گسست میان نتایج پژوهشی و تجارب میدانی | Wu, (2016)<br>Hu et al. (2016) |

1. Ion exchange
2. Flocculation
3. Electrodialysis
4. Membrane filtration
5. Reverse osmosis
6. Precipitation
7. Photodegradation
8. Adsorption
9. Advanced oxidation processes (Ozonation)
10. Ion-pair extraction
11. Constructed wetlands
12. Riparian management
27. Visible light photocatalysis
28. Functionalized carbon nano-springs
29. Green photocatalysis
30. Thermal degradation
17. Bioreactors
18. Bioaugmentation
19. Biostimulation

**جایگاه زیست‌پالایی در آلاینده‌زدایی**

نگرش‌های مبتنی بر بهره‌مندی از ظرفیت جوامع زیستی در پالایش مکان‌های آلوده همواره مورد توجه محققین قرار داشته است. در این رابطه، زیست‌پالایی، به کاربرد ریزجانداران در حذف یا کاهش غلظت آلاینده‌ها در مکان‌های آلوده گفته می‌شود (Boopathy 2000). زیست‌پالایی را می‌توان در محل اصلیِ آلودگی (به صورت درجا)[1] یا در خارج از مکان اصلی (به صورت دگرجا)[2] بکار گرفت (Boopathy 2000).

علی‌رغم پتانسیل بالای جوامع زیستی در رفع آلاینده‌های زیست‌محیطی، استفاده از ریزجانداران در فرایندهای زیست‌پالایی با برخی از چالش‌ها روبرو بوده است. به عنوان مثال، راندمان تغییر و تبدیل سوبسترا میان جوامع میکروبی مختلف بسیار متغیر است. این امر، بر عملیاتی بودن برنامه‌های زیست‌پالایی موثر خواهد بود. همچنین، استقرار موفق ریزجانداران در محیط‌های آلوده، که خود به قابلیت سازگاری و نیز مقاومت گروه‌های میکروبی به غلظت‌های بالای آلاینده‌ها بازمی‌گردد، بین گروه‌های میکروبی مختلف متفاوت است (Ha et al 2009). از سوی دیگر، وجود برخی از گروه‌های عاملی در ساختار بعضی از آلاینده‌ها (مانند گروه دی‌متیل آمینو در ساختار کریستال ویوله)، از تجزیه کامل این ترکیبات توسط ریزجانداران ممانعت می‌نماید (Jang et al 2005). افزون بر آن، در غالب مطالعات صورت گرفته، از گونه‌های میکروبیِ منفرد[3] برای حذف آلاینده‌ها استفاده بعمل آمده است. این در حالی است که محیط‌های طبیعی (مانند خاک و آب)، معمولا، شامل مجموعه‌ای از آلاینده‌های مختلف با منشاء نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای[4] هستند که نهایتا، تجزیه توأم آلاینده‌های مختلف را دشوار می‌سازد. بر این اساس، توسعه و کاربرد یک کنسرسیوم میکروبیِ چند منظوره[5] با ساختار و ترکیب پایدار در پروژه‌های زیست‌پالایی، از اهمیت عملیاتیِ بالا در حذف همزمان دامنه گسترده‌ای از آلاینده‌ها برخوردار خواهد بود. در این راستا، پریفایتون، به عنوان یک موجودیت زیستیِ پویا با قابلیت‌های خود تنظیمی و ظرفیت‌های عظیم در آلاینده‌زدایی معرفی گردیده است (Wu, 2016).

پریفایتون، یک بوم‌سازگان خرد [6]، مستقل و بخش جدایی‌ناپذیری از اکوسیستم‌های غرقاب است. بیوفیلم یا لایه زیستیِ پریفایتیک، مشتمل بر ماتریس موکوپلی‌ساکاریدی پیچیده، همراه با انواع فتوتروف‌ها، هتروتروف‌ها و نیز کمواتوتروف‌ها است (Larned, 2010). اجزای زیستی پریفایتون، شامل جلبک‌ها و دیاتوم‌ها (به عنوان اصلی‌ترین عناصر سازنده لایه زیستی)، باکتری‌ها، قارچ‌ها، پروتوزوا و نیز متازوا است (علیخانی و همکاران، ۱۴۰۰). اجزای غیرزیستی پریفایتون، شامل بقایای آلی و معدنی مختلف است. این موجودیت زیستی، غالبا، بر روی بسترهای فرورفته در آب، مانند سنگ‌ها و اندام گیاهان استقرار می‌یابد (Wu, 2016). جوامع زیستی پریفایتیک، از توانایی ذاتی در پاسخ به عوامل خارجی و نیز ترمیم سریع در برابر مخاطرات محیطی برخوردار هستند (Prosser et al., 2013). علاوه‌بر نقش‌های پریفایتون در افزایش تنوع زیستی، تولیدات اولیه و چرخه‌های عناصر غذایی در بوم‌سازگان‌های غرقاب، مشخص شده است که این جامعه میکروبیِ پیچیده، از قابلیت بالایی در آلاینده‌زدایی برخوردار است. در این رابطه، جوامع پریفایتیک، قادر به تغییر و تبدیل و استفاده از انواع آلاینده‌ها مانند فلزات سنگین، زباله های دارویی، آلاینده های آلی پایدار و نیز مواد پلاستیکی هستند (Faheem et al., 2020b).

**لایه‌های زیستی پریفایتیک**

کلنیزاسیون لایه‌های زیستی پریفایتیک بر روی بسترهای مختلف، از طریق سازوکاری با چهار مرحله صورت می‌پذیرد: (۱) یک لایه پیش‌شرط (شایسته‌سازی سطح[7]) از طریق جذب سطحی مواد معدنی و عناصر غذایی بر روی سطح بستر ایجاد می‌شود و با گذشت زمان، واکنش‌های بیوشیمیاییِ فعال در ایجاد این لایه، به یک تعادل پویا با محیط اطراف می‌رسند؛ (۲) کلنیزاسیون اولیه با جذب سطحی باکتری‌ها بر روی بستر و تولید مواد پلیمری برون سلولی (EPS)[8] صورت می‌گیرد؛ (۳) در کلنیزاسیون ثانویه، الحاق سایر ریزجانداران مانند سیانوباکتری‌ها، قارچ‌ها، پروتوزوا، دیاتوم‌ها و نیز جلبک‌ها (در صورت مساعد بودن شرایط نوری)، ساختار سه بعدی لایه زیستی پریفایتیک را تشکیل می‌دهد؛ در نهایت، (۴) اضافه شدن جانداران چند سلولی، به عنوان آخرین و نیز طولانی‌ترین مرحله توسعه جامعه زیستی، شکل‌گیری بیوفیلم پریفایتیک را تکمیل می‌نماید (Wu, 2016).

---

1. In situ
2. Ex situ
3. Single microbial species
4. Point and non-point sources
5. Multi-functional microbial consortium
39. Micro-ecosystem
40. Surface conditioning
8. Extracellular Polymeric Substances (EPS)

حیات در لایه‌های زیستی، با منافع استراتژیک در رقابت و بقا در محیط‌های طبیعی همراه است. در این راستا، ، تجمع یافتن عناصر غذایی در بیوفیلم، تبادل و انتقال افقی ژنها میان ریزجانداران ساکن لایه‌های زیستی و نیز محافظت بیوفیلم از اجزای میکروبی در برابر ترکیبات سمی و تنش‌های محیطی، شرایط لازم جهت استقرار یافتن کنسرسیوم‌های میکروبیِ پایدار را در شرایط تغییرپذیر، ممکن می‌سازد (Rummel et al., 2017). لایه‌های زیستی، شرایط مناسبی جهت تعامل و برهمکنش‌های میکروبی میان ریزجانداران در فواصلی کوتاه از یکدیگر و در بستری از پلی‌ساکاریدها را فراهم می‌آورند (Zhou et al., 2013). در این خصوص، عبارت «فیکوسفر[1]» (مشابه به مفهوم ریزوسفر[2])، برای اشاره به روابط متقابل شکل گرفته میان ریزجانداران اتوتروف و هتروتروف در محیط‌های آبی بکارگرفته می‌شود. به عبارت دیگر، فیکوسفر، یادآور محیطی در نزدیک‌ترین فاصله از یک سلول، زنجیره یا کلنی جلبکی است که در آن محدوده، مواد برون سلولیِ ترشح یافته از اجزای جلبکی موجب تحریک رشد باکتری‌های مفید می‌گردد (Perkovic et al., 2022).

در هم‌افزایی‌های صورت گرفته در فیکوسفر، جوامع باکتریایی به عنوان مهمترین منابع کوبالامین و ویتامین‌های خانواده B عمل می‌نمایند و از طریق تولید موادی با ماهیت هورمونی، موجب تحریک رشد جوامع میزبان جلبکی در بیوفیلم می‌شوند. در مقابل، کربن آلی تولید شده توسط جزء فتواتوتروف، به عنوان منبعی از مواد غذایی برای جوامع میکروبی هتروتروف وابسته، ایفای نقش می‌نماید (Kazamia et al., 2012). علاوه بر هم‌افزایی‌های صورت یافته میان اجزای لایه زیستی، جامعه پریفایتیک قادر است از طریق روابط آنتاگونیستی و رقابتی، رشد گروه‌های میکروبی در خارج از بیوفیلم را نیز تحت تاثیر قرار دهد (Freilich et al., 2011). برهمکنش‌های منفی و روابط رقابتی بین پریفایتون و سایر ریزجانداران، از طریق فرایند آللوپاتی[3] صورت می‌پذیرند. تولید انواع آنتی‌بیوتیک‌ها و آنزیم‌ها، که از طریق وزیکول‌های برون سلولی به سلول‌های رقیب انتقال می‌یابند، فرایندهایی همچون تمایز سلولی، تولید پروتئین‌ها و نیز ارتباطات بین‌سلولی را در ریزجانداران رقیب مهار می‌سازند (Stubbendieck and Straight, 2016). بر این اساس، می‌توان اذعان نمود که لایه‌های زیستی پریفایتون از قابلیت کنترل زیستیِ[4] گونه‌های رقیب در محیط غرقاب نیز برخوردار هستند.

مهمترین ویژگی‌های لایه‌های زیستی پریفایتیک، به بستر EPS تولید شده توسط اجزای تشکیل دهنده بیوفیلم نسبت داده می‌شود. مواد پلیمری برون سلولی، در برگیرنده ترکیبات آلی متنوع مانند پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک، لیپیدها و نیز مواد هیومیک است (Mohite et al 2017). در این راستا، پیچیدگی در ساختار مواد مترشحه، باعث ایجاد پیچیدگی در ویژگی‌های عملکردیِ لایه زیستی می‌گردد (Naveed et al 2019). به عنوان مثال، EPS به عنوان منابع مهم کربن آلی و نیز عناصر غذایی برای ریزجانداران مختلف و سطوح بالاتر شبکه غذایی ایفای نقش می‌نماید (Decho and guatirrez 2017). از سوی دیگر، ترشح EPS توسط اجزای بیوفیلم، به عنوان یک سازوکار دفاعی برای محافظت از ساکنین لایه زیستی در برابر تنش‌های محیطی (مانند کمبود عناصر غذایی و حضور آلاینده‌ها) عمل می‌نماید (Borah et al 2018).

به طور کلی، حضور در لایه‌های زیستی باعث افزایش مقاومت اجزای پریفایتون در برابر تغییرات نامطلوب در شرایط محیطی می‌شود (Edwards and Kjellerup 2013). همچنین، EPS قادر است از طریق عملکرد به عنوان سورفکتانت‌ها باعث افزایش حلالیت آلاینده-های پایدار شود و از طریق جذب سطحی آلاینده‌ها بر روی گروه‌های عاملی خود، در راستای حذف آلاینده‌ها از محیط اطراف عمل کند (Edwards and Kjellerup 2013). تنوع گونه‌ای و نیز تعداد زیاد ریزجانداران متعلق به گروه‌های فیزیولوژیک مختلف در لایه زیستی پریفایتون و نیز مقاومت ذاتی این جامعه زیستی در برابر شرایط تنش‌زا (Boles et al 2004)، باعث برتری پریفایتون در سازگاری با شرایط نامطلوب، نسبت به ریزجانداران منفرد و سلول‌های مجزا در خارج از لایه‌های زیستی می‌گردد. از سوی دیگر، احتمالا بتوان ادعا و اذعان نمود که وجود تنوع ژنتیکی در لایه زیستی پریفایتیک، امکان استفاده توأم و همزمان از دامنه گسترده‌ای از سوبسراها را برای جامعه زیستیِ درون بیوفیلم ممکن می‌سازد. مجموعه ویژگی‌های پیش گفته، پریفایتون را به یک موجودیت زیستیِ قدرتمند برای استفاده در زیست‌پالایی تبدیل می‌سازد.

**تعامل پریفایتون با محیط‌های آلوده**

**تغییرات درونی در بیوفیلم پریفایتیک**

نفوذ ناپذیری نسبی کنسرسیوم میکروبی در بیوفیلم پریفایتون، باعث تطبیق این خُرد–بوم‌سازگان با انواع تغییرات فیزیکی و شیمیایی در

1. Phycosphere
2. Rhizosphere
3. Allelopathy
4. Biocontrol

محیط خارجی، مقابله آن با تنش‌های زیستی و غیر زیستی و نیز گرایش لایه‌های زیستی به تنظیم فرایندهای داخلی در بیوفیلم پریفایتیک می‌گردد (Faheem et al., 2020a). بر این اساس، ایستادگی پریفایتون در برابر انواع آلاینده‌های پیچیده، موجب تطبیق و سازگاری سریع آن با شرایط محیطی و توسعه لایه‌های زیستی، در طی تنها چندین دقیقه تا چندین ساعت می‌شود (Shabbir et al., 2020؛ Parrish and Fahrenfeld, 2019). حساسیت پریفایتون به تغییرات محیطی و غلظت آلاینده‌های آلی و غیر آلی، امکان استفاده از این جوامع زیستی به عنوان نشانگرهای بیولوژیک[1] در شناسایی آلاینده‌ها و نیز تعیین درجه آلودگی در بوم‌سازگان‌های غرقاب را فراهم می‌آورد (Miao et al., 2019b).

کاربرد پریفایتون به عنوان یک نمایه زیستی کارآمد برای تشخیص وضعیت آلودگی در یک بوم‌سازگان غرقاب، بر دو رویکرد کلیدی استوار است. در یک دیدگاه، تغییرات ایجاد شده در ترکیب ساختاری لایه زیستی پریفایتون (به معنای تنوع زیستی و فراوانی نسبی گونه‌ها در بیوفیلم)، نتیجه تعامل پریفایتون با اجزای محیط و نمایانگر وضعیت بوم‌سازگان در بلند مدت خواهد بود. از منظری دیگر، تغییرات درون سلولی و بین سولی و تغییر در فرایندهای فیزیولوژیک و متابولیت‌ها در پریفایتون، بازتابی از آخرین نوسانات در بوم‌سازگان است.

**پاسخ پریفایتون در برابر آلاینده‌های مختلف**

از جمله مهمترین اثرات مشاهده شده در جوامع زیستی پریفایتیک در حضور آلاینده‌ها، می‌توان به تغییرات ایجاد شده در ترکیب ساختاری بیوفیلم‌ها، تغییر در غالبیت و فراوانی گونه‌های زیستی اشاره کرد (Kostel et al., 1999). در این خصوص، فشار انتخابی اعمال شده از سوی آلاینده، موجب حذف گونه‌های حساس و افزایش فراوانی گونه‌های مقاوم در جامعه زیستی می‌گردد. این مفهوم، تحت عنوان «مقاومت القاء شده ناشی از ماده آلاینده (PICT)[2]» شناخته می‌شود (Tlili et al., 2010). به طور کلی، پایش نوسانات در فرایندهای متابولیک کلیدی (مانند فتوسنتز و تنفس) از عملکرد بهتری در مقایسه با بررسی تغییرات صورت گرفته در ترکیب ساختاری بیوفیلم در زمان تشخیص اثرات کوتاه مدت آلاینده‌ها بر جامعه زیستی برخوردار است. در مقابل، از تغییرات ایجاد شده در ترکیب ساختاریِ جوامع زیستی پریفایتیک، غالبا، به منظور ردیابی اثرات ناشی از برهمکنش طولانی مدت پریفایتون با غلظت‌های پایین آلاینده‌ها در محیط استفاده بعمل می‌آید (Wu, 2016). به طور کلی، باید در نظر داشت که پاسخ جامعه پریفایتیک در برابر نوع خاصی از آلاینده‌ها در بوم‌سازگان غرقاب، تا حد زیادی، به ترکیب جامعه زیستی در ابتدای این برهمکنش بستگی دارد (Tlili et al., 2008). در این راستا، به نظر می‌رسد بیوفیلم‌ها با تنوع گونه‌ای بیشتر، از مقاومت بالاتری در برابر ترکیبات استرس‌زا و آلاینده‌های محیطی برخوردار هستند (Mackay et al., 2022).

در مطالعه صورت گرفته توسط Kostel و همکاران (۱۹۹۹)، پس از قرار گرفتن پریفایتون در معرض ترکیب پلی‌کلر بیفنیل، غالبیت گونه‌ها در بیوفیلم پریفایتیک، از جامعه‌ای که تحت سلطه یک جانبه دیاتوم‌ها بود، به جامعه‌ای که در آن دیاتوم‌ها به همراه سیانوباکترها فراوان‌ترین گونه‌های زیستی موجود را شامل می‌شدند، تغییر یافت. در این پژوهش، کاهش فراوانی دیاتوم‌ها از ۸۱ درصد تا ۶۸ درصد، به محدودیت‌های ایجاد شده در تقسیم سلولی و نیز اختلال در تکثیر این جوامع زیستی در اثر سمیت پلی‌کلرید بیفنیل نسبت داده شد (Kostel et al. 1999). در پژوهشی دیگر، برهمکنش جوامع پریفایتیک با دی‌متیل اوره دی‌کلروفنیل (با غلظت ۶/۵ میکروگرم در لیتر) به مدت چهار هفته، باعث تغییر غیرقابل بازگشت جامعه زیستی، با افزایش غالبیت دیاتوم‌ها در بیوفیلم شد (Magnusson et al. 2012). در مطالعه‌ای مشابه، قرار گرفتن بلند مدت پریفایتون در معرض سم سی‌بوترین، موجب افزایش مقاومت بیوفیلم پریفایتیک در برابر غلظت‌های کشنده این ترکیب شد (Blanck et al., 2009). بررسی نحوه اثرگذاری آفت‌کش ایزوپروترون بر پریفایتون نیز حاکی از افزایش فراوانی انواع هتروتروف اختیاری در لایه زیستی، در حضور آفت‌کش بود. این امر، با عنایت به تاثیر ایزوپروترون بر مهار فرایند فتوسنتز در انواع فتواتوتروف توجیه گردید (Debenest et al., 2009). در پژوهشی دیگر، جوامع پریفایتیک، رابطه قابل مشاهده‌ای را میان شرایط نوری در محیط و نیز سمیت ناشی از آترازین به نمایش گذاشتند. در این خصوص، حساسیت پریفایتون در برابر آترازین (به مفهوم سمیت ایجاد شده در جوامع پریفاتیک) در حضور آفت‌کش آترازین، با افزایش پارامترهای نوری در محیط تشدید یافت (Guasch et al., 2003).

بر پایه اطلاعات ارایه شده در پژوهش‌های مختلف، فراهمی زیستی و نیز سمیت فلزات سنگین برای لایه‌های زیستی پریفایتیک، به ساختار فیزیولوژیکی و خصوصیات شیمیایی پریفایتون وابسته است (Lombardi et al., 2002). در برخی از موارد، مشاهده تجمع فلزات سنگین درون پریفایتون، حتی در زمان عدم امکان تشخیص غلظت‌های بسیار پایین این عناصر در محیط اطراف، صورت پذیرفته است (Duong et al., 2008). از جمله مهمترین فلزات سنگین با قابلیت ایجاد تغییر در پریفایتون، می‌توان به عناصر روی، کادمیوم، سرب و

46. Bioindicators
47. Pollution-induced community tolerance (PICT)

نیز کرومیوم اشاره نمود. به عنوان مثال، عنصر روی، از پتانسیل بالایی در ایجاد تغییر در ترکیب ساختاری جامعه زیستی پریفایتون، برخوردار بود. بر اساس نتایج بدست آمده از پژوهش‌ها، غلظت‌های پایین روی (در حد ۰/۰۵ میلی‌گرم در لیتر)، موجب جایگزین شدن دیاتوم‌ها توسط سیانوباکترها در لایه‌های زیستی پریفایتون گردید (Serra et al., 2009).

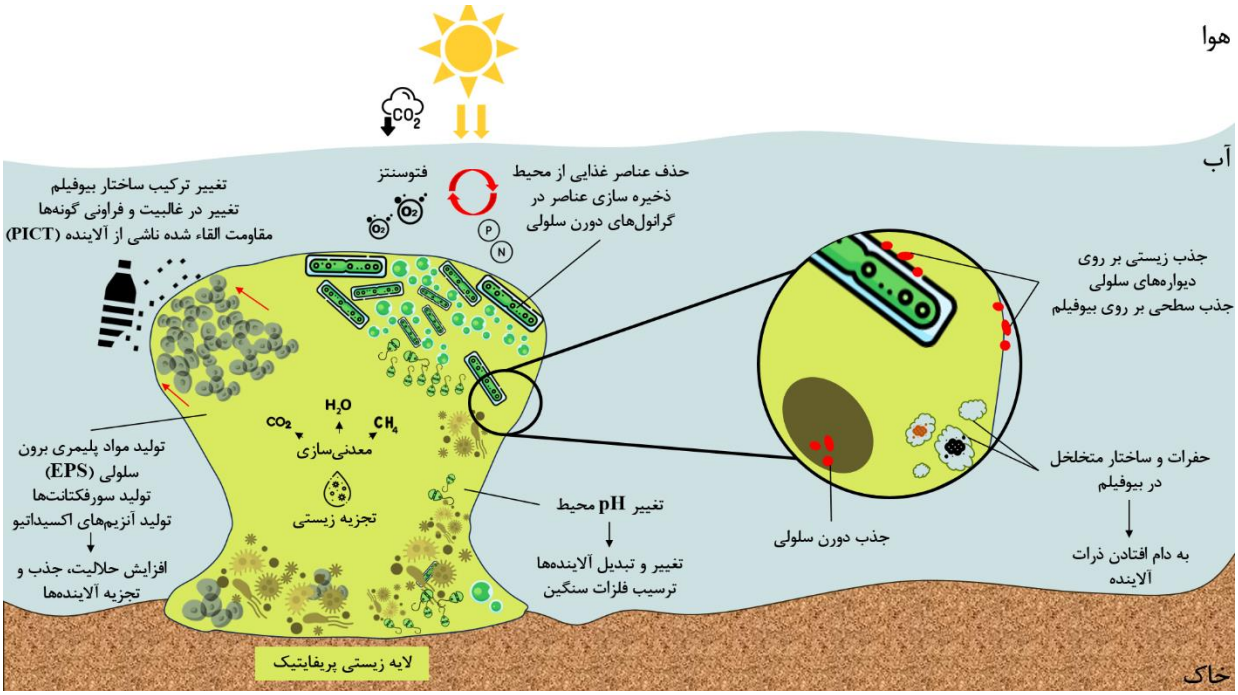
نتایج بدست آمده از پژوهش‌ها نشان داده است که پلیمرهای پلاستیکی نیز موجب تغییر در ساختار جوامع زیستی و متعاقبا، تغییر در فرایندهای میکروبی صورت گرفته در بیوفیلم‌های پریفایتیک می‌شوند. ترکیب لایه‌های زیستی مستقر بر روی سوبستراهای پلاستیکی، تا حد زیادی، تحت تاثیر نوع ذره پلاستیکی قرار دارد (Chen et al., 2019). در این خصوص، میکروپلاستیک‌ها (به معنای ذرات پلاستیکی با اندازه بین ۱ تا ۵ میلی‌متر)، با اعمال یک فشار انتخابی بر ساختار جامعه میکروبی، موجب کاهش فراوانی و تنوع زیستی در بیوفیلم‌ها می‌شوند. تغییر در ساختار میکروبی، غالبا، با افزایش نسبی گونه‌های مقاوم به آلاینده و نیز افزایش فراوانی انواع توانا در تجزیه زیستی پلیمرهای پلاستیکی همراه است (Li et al., 2019). به عنوان مثال، نتایج بدست آمده از بررسی‌ها پیرامون ترکیب ساختاری لایه‌های زیستیِ مستقر بر روی میکروپلاستیک‌ها، حاکی از غالب بودن جنس سودوموناس با توانایی تجزیه پلی‌وینیل الکل بود (McCormick et al., 2014). همچنین، اطلاعات ارایه شده در گزارش‌ها، حاکی از تغییر در فرایندهای متابولیکی جوامع پریفایتیک در حضور میکروپلاستیک‌ها بوده است. به عنوان مثال، افزایش متابولیسم اسیدهای آمینه، کوفاکتورها و نیز ویتامین‌ها در لایه‌های زیستی استقرار یافته بر روی میکروپلاستیک‌ها مشاهده شد (Miao et al., 2019b). همچنین، نشان داده شد که افزایش آزادسازی ترکیبات پلیمری برون سلولی در بیوفیلم پریفایتیک به عنوان نوعی مکانسیم دفاعی در برابر اثر سمی ترکیبات حاصله از تجزیه میکروپلاستیک‌ها (مانند بیس (۲-اتیل‌هگزیل) فتالات) صورت می‌گیرد (Li et al., 2019). نتایج بدست آمده از پژوهش صورت گرفته توسط Miao و همکاران (۲۰۱۹b)، حاکی از تاثیر نانوپلاستیک‌ها بر کاهش میزان رنگیزه فتوسنتزی کلروفیل a و کاهش فعالیت آنزیم‌های بتا-گلوکوسیداز و لوسین آمینو پپتیداز در پریفایتون بود (Miao et al., 2019b).

بر مبنای اطلاعات ارایه شده، به نظر می‌رسد که کاربرد جوامع میکروبیِ مشتمل بر گروه‌های میکروبی متنوع، بهتر از کاربرد گونه‌ها یا سویه‌های میکروبی منفرد در رفع آلودگی ایجاد شده توسط ترکیبات آلاینده عمل می‌نماید. حضور چندین گروه میکروبی متعلق به دسته‌بندی‌های فیزیولوژیک مختلف، با نیازمندی‌ها و توانایی‌های متفاوت در یک جامعه زیستی، می‌تواند باعث افزایش مقاومت و نیز تقویت سازگاریِ جامعه زیستی با دامنه گسترده‌ای از شرایط محیطی گردد. نتایج بدست آمده از مطالعات، نشان می‌دهد که حضور آلاینده‌ها در محیط خارجی، باعث ایجاد تغییر در ترکیب ساختار جوامع میکروبی می‌شود. بنابراین، یک کنسرسیوم میکروبی، استخر ژنی وسیعی را در محیط فراهم می‌آورد، که تحت تاثیر فشار انتخابیِ القاء شده از سوی محیط یا اجزای آن (مانند آلاینده‌ها)، منجر به گزینش مجموعه‌ای از ویژگی‌ها و فرایندهای سازگار با شرایط حاکم بر محیط می‌گردد. تغییرات صورت گرفته در ساختار جوامع میکروبی در اثر آلاینده‌ها، غالبا، در راستای انتخاب گونه‌های مقاوم به آلاینده‌ها و با قابلیت تجزیه‌کنندگی این ترکیبات همراه است. در این مقوله، می‌توان اذعان داشت که تغییر آرایش یک کنسرسیوم میکروبی تحت تاثیر ویژگی‌های محیطی و آلاینده‌ها، باعث استقرار یک جامعه میکروبیِ پایدار در محیط می‌شود، که علاوه‌بر توانایی بالا در تجزیه ترکیبات آلاینده، در تعادل بوم‌شناختی با محیط اطراف فعالیت می‌نماید. این مهم، امکان بهره‌مندی پایداری از ظرفیت‌های کنسرسیوم‌های میکروبی در حذف بهینه آلاینده‌های محیطی را فراهم می‌سازد. بر این اساس، ضروری است با مطالعه و تشریح دقیق ویژگی‌ها و عملکردهای کنسرسیوم‌های میکروبی مختلف، نسبت به شناسایی، گزینش، بهینه‌سازی و نیز بهره‌وری از ظرفیت‌های این جوامع زیستی، در ایجاد و توسعه فناوری‌های نوین زیست‌پالایی، اقدام گردد.

**ظرفیت پریفایتون در زیست‌پالایی**

در این بخش، نتایج بدست آمده از مطالعات پیرامون چگونگی برهمکنش پریفایتون با برخی از مهمترین آلاینده‌های زیست محیطی و نیز موفقیت لایه‌های زیستی پریفایتیک در حذف این آلاینده‌ها، به عنوان یکی از اصلی‌ترین بخش‌های مقاله حاضر، شرح داده شده است. آلاینده‌هایی که در این مقاله به آنها پرداخته‌ایم، شامل ترکیبات آلی و داروهای شیمیایی، فلزات سنگین، میکروپلاستیک‌ها و نیز عناصر غذایی است. مطالعات موجود پیرامون ظرفیت پریفایتون در زیست‌پالایی، چگونگی برهمکنش این جامعه زیستی با آلاینده‌های مختلف را به صورت جداگانه و مستقل مورد بررسی قرار داده است. در مطالعه مروری حاضر، سعی بر آن است تا با ارایه، تحلیل و مقایسه نتایج بدست آمده از پژوهش‌های مختلف، منبع اطلاعات و دانش قابل تعمیم، کل‌گرا و کاربردی در خصوص جوانب مختلف برهمکنش پریفایتون با طیف وسیعی از آلاینده‌ها، در اختیار جامعه علمی قرار داده شود. در این راستا، پرداختن مسنجم به سازوکارهای مختلف جوامع پریفایتیک در پالایش زیستی آلاینده‌های متفاوت، بینشی جامع را در زمینه ظرفیت‌های زیست‌پالایی پریفایتون ، ارایه می‌نماید. شکل (۱)، فراترکیبی

نمادین از عملکردها و سازوکارهای مختلف که به منظور حذف آلاینده‌های زیست محیطی از زیست‌بوم غرقاب توسط جوامع پریفایتیک بکار گرفته می‌شوند را به نمایش گذاشته است. جزئیات این سازوکارها، در زیربخش‌های زیر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.




**شکل ۱- کلیدی‌ترین سازوکارهای بکار گرفته شده توسط لایه‌های زیستی پریفایتیک در مقابله با آلاینده‌های زیست‌محیطی و حذف آن‌ها از زیست‌بوم غرقاب**

### حذف آلاینده‌های آلی و داروهای شیمیایی

آلاینده‌های آلی یا داروهای شیمیایی، به شکل گسترده‌ای برای تولید داروها، رنگ‌ها، نگهدارنده‌ها، آفتکش‌ها و نیز افزودنی‌های شیمیایی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ترکیبات، به عنوان مواد خام و یا محصولات جانبی در فرایندهای صنعتی تولید شده و به محیط زیست راه می‌یابند. بسیاری از این ترکیبات تجزیه‌پذیر نیستند و برای مدت‌های طولانی به صورت پایدار در محیط باقی می‌مانند. از جمله آلاینده‌های آلی و داروهای شیمیایی، می‌توان به آلاینده‌های آلی پایدار، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAH)[1]، فنول‌ها، کینولین، افزودنی‌های نرم‌کننده پلاستیک[2]، هیدروکربن‌ها و نیز ترکیبات مختل‌کننده عملکرد غدد (EDC)[3] اشاره نمود. نتایج بدست آمده از پژوهش‌ها، حکایت از قابلیت پریفایتون در حذف آلاینده‌های آلی و داروهای شیمیایی داشته است. در این خصوص، کلیدی‌ترین سازوکارهای پریفایتون برای مقابله با آلاینده‌های مذکور و حذف آنها از محیط، در قالب سه فرایند جذب زیستی[4] ، جذب درون سلولی[5] و نیز تجزیه زیستی[6] خلاصه می‌شود.

نتایج بدست آمده از مطالعات مختلف، بیانگر حضور مقادیر متغیری از انواع آلاینده‌های آلی در لایه‌های زیستی پریفایتیک بوده است. در این مقوله، جذب زیستی آلاینده‌های آلی بر روی EPS، به عنوان یکی از مهم‌ترین سازوکارها برای حذف این دسته از آلاینده‌ها معرفی شده است (WU, 2016). وجود گروه‌های عاملی مختلف بر روی EPS مترشحه توسط اجزای زیستی بیوفیلم، امکان جذب سطحی ترکیباتی همچون آلاینده‌های آلی پایدار، آروماتیک‌ها و نیز رنگ‌های آبگریز را ممکن می‌سازد (Sheng et al 2010). جذب ترکیبات رنگی و مواد شیمیایی آبگریز در سطح EPS و حذف این ترکیبات از محیط اطراف، از اهمیت بالایی برخوردار است؛ چرا که خاصیت آبگریزی در این ترکیبات، آنها را در معرض تجمع و بزرگنمایی زیستی[7] در امتداد زنجیره غذایی قرار می‌دهد و باعث بروز عملکرد آنها به عنوان ترکیبات سرطان‌زا و مختل کننده عملکرد غدد در موجودات زنده و انسان می‌شود (Bonefeld-jorgensen et al 2006). در این رابطه،

1. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH)
2. Plasticizers
3. Endocrine-disrupting Compounds (EDC)
4. Biosorption
5. Assimilation (absorption)
6. Biodegradation
7. Bioaccumulation and biomagnification

نتایج ارایه شده در مطالعات مختلف، بیانگر افزایش حلالیت آلاینده‌های آلیِ آبگریز در اثر فعالیت لایه‌های زیستی بوده است. افزایش حلالیت آلاینده‌های آلی، به دنبال برهمکنش آنها با لایه‌های زیستی، امکان ورود آلاینده‌ها به داخل بیوفیلم و نیز تغییر و تبدیل آنها توسط فرایندهای زیستی را فراهم می‌سازد (Johnsen and karlson 2004).

حضور توأم گونه‌های مختلف با قابلیت‌های آنزیمی متنوع در خُرد–بوم‌سازگان پریفایتون، شرایط لازم برای تجزیه زیستی دامنه گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی را برای لایه‌های زیستی پریفایتیک معمول می‌سازد. به عنوان مثال، نشان داده شده است که حضور ریزجانداران تولید کننده آنزیم‌های اکسیداتیو در لایه‌های زیستی، باعث تجزیه ترکیبات فنولی می‌گردد (Olaniran and igbinosa 2011). انواع مختلفی از گروه‌های میکروبی مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها و نیز مخمرها در بیوفیلم پریفایتون از توانایی تولید آنزیم‌های مذکور و متعاقبا، تجزیه زیستی فنول‌ها برخوردار هستند (Kurzbaum et al 2010). از جمله دیگر آنزیم‌های موثر در حذف آلاینده‌های آلی توسط پریفایتون می‌توان به منگنز پراکسیداز و لاکاز اشاره نمود که با ایجاد اختلال در فعالیت‌های اِستروژنیک آلاینده‌های آلی، مانع از بروز اثرات منفی این ترکیبات بر جوامع زیستی می‌گردند (Kang et al 2006). از جمله دیگر سازوکارها برای حذف اثر آلاینده‌های مختلف توسط پریفایتون، می‌توان به متابولسیم مشترک[1] و تغییر و تبدیل همزمان بیش از یک ترکیب آلی توسط ریزجانداران مختلف ساکن بیوفیلم اشاره نمود. در این رابطه، مجموعه‌ای از فرایندهای اکسیداتیو و احیایی در متابولیسم مشترک و نیز حذف توأم چندین آلاینده آلی پایدار توسط بیوفیلم‌ها، نقش ایفا می‌نماید (Edwards and Kjellerup 2013). به عنوان مثال، وقوع همزمان احیای نیترات و تجزیه زیستی PAH (Lolas et al 2012) و نیز کلرزدایی احیایی و حذف هالوکربن‌ها (Conrad et al 2010) توسط بیوفیلم‌ها، مشاهده شده است.

در مطالعه صورت گرفته توسط Shabbir و همکاران (۲۰۱۷)، جامعه پریفایتیک قادر به حذف بین ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر از ترکیب آزو آمارانت در طی ۳۶ تا ۷۲ ساعت بود. همچنین، در این مطالعه، انواع مختلف پریفایتون (شامل اپی‌فایتون، متافایتون و اپی‌لیتون) قادر به حذف کامل ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر ترکیب آزو آمارانت، پس از گذشت ۸۴ ساعت بودند (Shabbir et al 2017). در پژوهشی دیگر، تجزیه زیستی کامل غلظت‌های بالای رنگ کریستال ویوله (تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) توسط رآکتورهای زیستی حاوی متافاتون و اپی‌لیتون در طی ۷۲ تا ۸۴ ساعت، گزارش شد (Shabbir et al 2018). همچنین، اخیرا، توانایی پریفایتون در حذف ۱۰۰ درصدی ترکیبات EDC (با غلظت ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر) و نیز تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن به مقدار ۱۴/۷ درصد، به صورت همزمان، نشان داده شد (Shabbir et al 2022).

**حذف فلزات سنگین**

فلزات سنگین، از جمله مهمترین آلاینده‌های منابع آب و خاک بشمار می‌روند که از قابلیت تجمع زیستی و نیز القای جهش و سرطان در بدن انسان برخوردارند (Fu and Xi 2020). بر اساس گزارش ارایه شده توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا (EPA)[2]، عناصر سرب، کادمیوم و کرومیوم، از جمله فلزات سنگین با جدی‌ترین تهدید برای سلامت عمومی شناخته شده‌اند (Bhatka et al 2012). در این خصوص، ویژگی‌های ساختاری پریفایتون، باعث تجمع مقادیر بالایی از فلزات سنگین در این موجودیتِ زیستی می‌شود (Wu 2016). فضاهای متخلخل موجود در ساختار پریفایتون، امکان ورود فلزات سنگین به داخل بیوفیلم و نیز جذب و واجذب شدن عناصر فلزی را بر روی گروه‌های عاملی حاضر، فراهم می‌سازد. اهمیت ساختار متخلخل لایه‌های زیستی در حذف فلزات سنگین از محیط، در خصوص سایر تجمعات میکروبی نظیر بیوفیلم‌های *Bacillus* و نیز لایه‌های زیستی *Ralstionia* نشان داده شده است (Choi et al 2009). مشابه به سازوکارهای بکاررفته برای سایر آلاینده‌ها، پریفایتون قادر است از طریق جذب سطحی بر روی بیوفیلم، جذب سطحی بر روی دیواره‌های سلولی و نیز جذب درون سلولی، غلظت فلزات سنگین در محیط اطرف را کاهش دهد (Holding et al 2003). همچنین، اصلی‌ترین فرایندهایی که باعث آلاینده‌زدایی فلزات سنگین توسط پریفایتون می‌شود، شامل تبادل یونی، تشکیل کمپلکس و نیز ترسیب عناصر فلزی در ترکیبات نامحلول است (Sheng et al 2010).

نتایج بدست آمده از پژوهش‌ها، حکایت از همبستگی محتوای فلزات سنگین در لایه‌های زیستی پریفایتیک و غلظت این عناصر در محیط خارجی داشته است. همچنین، نشان داده شد که کاهش میزان فلزات سنگین در پریفایتون، آهسته‌تر از کاهش غلظت آلاینده‌ها در محیط خارجی صورت می‌پذیرد. این مشاهده، بیانگر قابلیت پریفایتون در تجمع فلزات سنگین است (Bradac et al 2010). ظرفیت پریفایتون در حذف فلزات سنگین، به ترکیب ساختاری لایه زیستی، ریزجانداران موجود در بیوفیلم و نیز ویژگی‌های EPS مترشحه توسط

1. Co-metabolism
2. Environmental Protection Agency of the United States of America (EPA-US)

آنان بستگی دارد (Wu 2016). در این رابطه، به نظر می‌رسد که حضور فلزات سنگین در محیط رشد پریفایتون، باعث ایجاد تغییر در مقدار و نوع مواد مترشحه توسط اجزای جوامع پریفایتیک می‌شود. به عنوان مثال، تولید مقادیر زیاد EPS (۵۴۸ میلی‌گرم در لیتر) توسط سویه‌ای از سیانوباکترها (*Synechocystis* sp. BASO671) در حضور غلظت‌های متغیر فلز سنگین کادمیوم (۱۵ تا ۳۵ میلی‌گرم در لیتر) گزارش شد (Ozturk et al 2010). به شکلی مشابه، میزان EPS تولید شده توسط *Thalassiosira weissflogii* در حضور عنصر نقره، بین ۱۰ تا ۲۷ برابر مقدار تولید این ترکیبات در نمونه شاهد (فاقد نقره) بود (Miao et al 2009). همچنین، تغییر در ترکیب مواد مترشحه همراه با افزایش ترکیباتی مانند تریپتوفان، تیروزین و نیز مواد هیومیک، که دارای تعداد زیاد گروه‌های عاملی هستند، باعث تقویت قابلیت پریفایتون در تثبیت فلزات سنگین گردید (Chen et al 2015). علاوه بر جذب فلزات سنگین توسط EPS، نشان داده شد که کاهش pH محیط توسط برخی از لایه‌های زیستی، باعث ترسیب فلزات سنگین در قالب ترکیبات نامحلول با دسترسی زیستی پایین می‌شود (Diels et al 2003).

بر اساس نتایج بدست آمده توسط Lopez و همکاران (۲۰۱۸)، لایه‌های زیستی پریفایتون توانستند از طریق تجمع آرسنیک درون بیوفیلم، اکسیداسیون آرسنیت به آرسنات و نیز ترشح ترکیبات آلی حاوی آرسنیک، غلظت این عنصر در محیط خارجی را کاهش دهند (Lopez et al 2018). در پژوهشی دیگر، پس از گذشت ۲۱ روز، بیش از ۸۴ درصد از نانوذرات نقره موجود در محیط، درون لایه‌های زیستی پریفایتیک تجمع یافت (Gil-Allue et al 2018). در مطالعه صورت گرفته توسط Faheem و همکاران (۲۰۲۰b)، لایه‌های زیستی اپی‌پلیک قادر به حذف کامل (۱۰۰ درصد) فلزات سنگین سرب (با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر)، کادمیوم (با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) و نیز حذف جزئی (۲۰ درصد) کرومیوم (با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) در طی ۲۱ روز بودند (Faheem et al 2020b). نتایج بدست آمده در پژوهشی دیگر، حاکی از قابلیت بالای پریفایتون در حذف همزمان فلزات سنگین سرب و کادمیوم و نیز آلاینده‌های میکروپلاستیک بود (Faheem et al 2020a).

**حذف میکروپلاستیک‌ها**

وجود ساختارهای خالص کربنی به عنوان اصلی‌ترین بخش ساختمان میکروپلاستیک‌ها، این ذرات را در برابر اکثر سامانه‌های پالایش، مقاوم می‌سازد. از سوی دیگر، تجزیه و تخریب طبیعی پلیمرهای پلاستیکی از طریق نور فرابنفش و فرایندهای اکسیداسیون در بوم‌سازگان خاک، تا چندین دهه به طول می‌انجامد. قابل ذکر است که این مدت، در اکوسیستم‌ها آبی و غرقاب بیشتر خواهد بود. بر این اساس، هر گونه شواهد مبنی بر بهبود تجزیه میکروپلاستیک‌ها از طریق فعالیت‌های زیستی حایز اهمیت است (Parrish and Fahrenfeld, 2019). استفاده از روش‌های بیوتکنولوژی در پالایش زیستی میکروپلاستیک‌ها به عنوان یکی از چالش‌ها در دستیابی به اهداف توسعه پایدار و نیز کنترل این دسته از آلاینده‌های زیست محیطیِ نوظهور معرفی شده است (Liu et al., 2021). نتایج مطالعه ساختار پریفایتون با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی[۱]، نمایانگر شبکه درهم تنیده‌ای از تجمعات و فضاهای خالی در ساختار بیوفیلم پریفایتیک بود، که انتظار می‌رود در اتصال پریفایتون به ذرات میکروپلاستیکی نقش مهمی ایفا نمایند (Shabbir et al., 2020). شکل‌گیری بیوفیلم پریفایتون بر روی میکروپلاستیک‌ها، تحت تاثیر ویژگی‌های ذرات پلاستیکی، شرایط محیطی و نیز خصوصیات ساختاری لایه‌های زیستی، قرار دارد.

اصلی‌ترین فرایندهای مربوط به تجزیه زیستی پلیمرهای مصنوعی توسط لایه‌های زیستی را می‌توان در پنج مورد، به شرح: (۱) تجمع جوامع میکروبی در اطراف پلیمر؛ (۲) تخریب مواد افزودنیِ نشت یافته از پلیمر پلاستیکی؛ (۳) حمله میکروبی به بنیان پلیمر؛ (۴) آبپوشی[۲] و نیز (۵) نفوذ ارگانسیم (مانند هیف‌های قارچی) به داخل ساختار پلیمر، خلاصه نمود. در ادامه، آزادسازی آنزیم‌های برون سلولی توسط ریزجانداران مستقر بر روی ذره پلاستیکی، باعث تولید زنجیره‌های کوتاهی از اولیگومرها، دایمرها و نیز مونومرها می‌شود. در نهایت، با عبور از غشاهای سلولی، این ترکیبات به عنوان منبعی از کربن، مورد استفاده اجزای زیستی سازنده بیوفیلم قرار می گیرند. مواد جذب شده توسط سلول‌ها، از طریق فرایند معدنی‌سازی، به ترکیباتی همچون دی‌اکسید کربن، آب و یا متان تبدیل می‌شوند (Rummel et al., 2017).

قابلیت ریزجانداران در تجزیه زیستی پلیمرهای پلاستیکی، در سویه‌های مختلف باکتریایی، گزارش شده است (Jacquin et al., 2019). از میان تولیدکنندگان اولیه، سیانوباکترهای میله‌ای متعلق به جنس *Phormidium*، از قابلیت تجزیه زیستی ذرات پلاستیکی

57. Scanning Electron Microscopy (SEM)
58. Hydration

برخوردار هستند (Oberbeckmann et al., 2016). در این خصوص، حضور گونه‌های مختلف از این جنس در لایه‌های زیستی توسعه یافته بر روی بسترهای پلاستیکی گزارش شده است (Nava and Leoni, 2021). به عنوان مثال، Yokota و همکاران (۲۰۱۷)، پیشنهاد کردند که سیانوباکترهای متعلق به جنس *Phormidium*، به صورت فعال، هیدرولیز پلیمرهای پلاستیکی در پلاستیک‌کره[1] (لایه احاطه کننده ذرات پلاستیکی در محیط آبی که دارای فعالیت میکروبی است) را بر عهده دارند (Yokota et al., 2017). در پژوهش صورت گرفته توسط Shabbir و همکاران (2020)، استفاده از پریفایتون، به عنوان رویکردی نوآورانه در کنترل آلاینده‌های پلاستیکی معرفی شد و موجب تجزیه میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن (به مقدار ۱۸/۰۲ درصد)، پلی‌اتیلن (به مقدار ۱۴/۰۲ درصد) و نیز پلی‌اتیلن ترفتالات (به مقدار ۱۹/۷۲ درصد) گردید. در این مطالعه، از قند گلوکز به عنوان سوبسترا همراه و نیز منبع اضافی کربن، استفاده بعمل آمد (Shabbir et al., 2020). نتایج بدست آمده از پژوهش‌های دیگر، مبین اثر بازدارنده فلزات سنگین بر فرایند تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها توسط پریفایتون بوده است. به این ترتیب، مشاهده شد که تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌های پلی‌اتیلن توسط پریفایتون، از ۱۲ تا ۱۴ درصد در تیمار عاری از فلزات سنگین، به ۳ تا ۵ درصد در تیمار حاوی فلزات سنگین سرب و نیز کادمیوم، کاهش یافت (Faheem et al., 2020a).

بر اساس یافته‌های ارایه شده توسط امیرحسینی و علیخانی (۱۴۰۱)، لایه‌های زیستی پریفایتیک از قابلیت بالایی برای استقرار و نیز تکثیر بر روی بسترهای میکروپلاستیکی برخوردار بودند. نتایج بدست آمده توسط ایشان، نشان داد که برهمکنش پریفایتون و میکروپلاستیک‌ها باعث به دام افتادن ذرات پلاستیکی در شبکه درهم تنیده پریفایتیک می‌شود. به عبارت دیگر، توسعه لایه‌های زیستی پریفایتیک بر روی بسترهای میکروپلاستیکی به گونه‌ای صورت می‌پذیرد که این ذرات (میکروپلاستیک‌ها) در بطن بیوفیلم‌ها محصور می‌شوند. تجمع یافتن میکروپلاستیک‌ها در داخل لایه‌های زیستی پریفایتیک می‌تواند از دیدگاه بوم‌شناختی حایز اهمیت باشد. به این ترتیب، به نظر می‌رسد که به دام افتادن میکروپلاستیک‌ها درون بیوفیلم‌های پریفایتیک، مانع از اثرگذاریِ نامطلوب این دسته از آلاینده‌ها بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و نیز زیستیِ محیط اطراف می‌گردد. از سوی دیگر، محتمل است که تجمع و تغلیظ ذرات میکروپلاستیکی در پریفایتون، امکان جمع‌آوری این ذرات از محیط را سهولت بخشد. همچنین، بر مبنای نتایج ارایه شده در این پژوهش، انواع مختلف پریفایتون (اپی‌فایتون و اپی‌پلون) قادر به تجزیه آلاینده‌های میکروپلاستیک بین ۱۱/۸۰ تا ۱۵/۲۰ درصد بودند. از سوی دیگر، تعامل پریفایتون با میکروپلاستیک‌ها باعث کاهش نیمه عمر این ذرات تا بیش از ۷۴ درصد شد (امیرحسینی و علیخانی، ۱۴۰۱).

در پژوهش صورت گرفته توسط Liu و همکاران (2021)، پتانسیل کاربرد بیوفیلم‌ها در جداسازی ذرات پلاستیکی از فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه‌ها، به عنوان سازوکاری نوین در تسخیر و نیز بازیابی میکروپلاستیک‌ها از محیط‌های آلوده مورد بحث قرار گرفت. بر اساس اطلاعات ارایه شده در این پژوهش، محصور شدن میکروپلاستیک‌ها توسط لایه‌های زیستی موجب تجمع آنها با غلظت‌های بالا در بیوفیلم می‌شود. این امر، با افزایش وزن میکروپلاستیک‌ها در لایه‌های زیستی همراه است. بنابراین، جداسازی میکروپلاستیک‌ها از فاضلاب آلوده در مخازن ته نشینی[2] و یا فیلترها، با سهولت و نیز کارایی بالاتری صورت خواهد گرفت (Liu et al., 2021).

**حذف عناصر غذایی**

مشارکت پریفایتون در چرخه‌های عناصر غذایی در بوم‌سازگان‌های غرقاب، یکی از شناخته شده‌ترین نقش‌های این جامعه زیستی است. شکل‌گیری لایه‌های زیستی پریفایتون در حد فاصل آب و رسوبات، نقشی کلیدی و غیرقابل جایگزین در تغییر و تبدیل اشکال مختلف عناصر غذایی در بوم‌سازگان‌های غرقاب ایفا می‌نماید. پریفایتون، به عنوان منبعی از عناصر غذایی (به ویژه فسفر) برای سایر اشکال حیات عمل می‌کند و از رشد گیاهان عالی در بوم‌سازگان‌های غرقاب حمایت می‌نماید. جزئیات مربوط به نقش پریفایتون به عنوان منبع عناصر غذایی و نیز عملکرد آن در راستای افزایش دسترسی عناصر غذایی برای گیاه، در مطالعات علیخانی و همکاران (۱۴۰۰) و نیز حقانی و همکاران (۱۴۰۱)، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در ادامه این بخش، به توانایی بیوفیلم‌های پریفایتیک در تعدیل غلظت‌های بیش از حد عناصر غذایی در بوم‌سازگان‌های غنی شده پرداخته شده است.

با افزایش تغییر کاربری اراضی و گسترش کاربری‌های فشرده، ورود مقادیر زیادی از انواع آلاینده‌ها مانند عناصر غذایی، ذرات معلق و نیز ریزجانداران به منابع آب فزونی یافته است. این امر، اهمیت توجه به کیفیت منابع آب را بیش از پیش نمایان می‌سازد. چرا که آلوده شدن منابع آب، با تبعاتی همچون پدیده غنی‌سازی[3] همراه است که به جوانب زیبایی‌شناسی، بیولوژیک و نیز اقتصادیِ این منابع کلیدی

1. Plastisphere
60. Sedimentation tanks
3. Eutrophication

لطمه می‌زند (Sutherland et al 2015). آزادسازی عناصر غذایی فسفر و نیتروژن از منابع غیرنقطه‌ای به عنوان منشاء اصلی این دسته از آلاینده‌ها در منابع آبی محسوب می‌شود و توجه محققین را برای دستیابی به رویکردهای کارآمد و توسعه فناوری‌های کارا جهت حذف این عناصر جلب نموده است (Sutherland and Craggs 2017).

به علت ماهیت فتواتوتروف پریفایتون، جذب عناصر غذایی توسط بیوفیلم پریفایتیک و ادغام آنها با زیست‌توده میکروبی با راندمان بالایی انجام می‌پذیرد (Merchant and Helmann 2012). همچنین، بر اساس گزارش‌های بدست آمده از پژوهش‌ها، به نظر می‌رسد که شکل‌گیری مکان‌های تخلیه شده از عناصر غذایی در نزدیکی سطح لایه‌های زیستی پریفایتیک، باعث ایجاد یک شیب غلظت از محیط خارجی به داخل بیوفیلم می‌شود، که متعاقبا، انتقال بیشتر عناصر غذایی از محیط خارجی به داخل بیوفیلم پریفایتون را سبب می‌گردد. این مفهوم، مشابه به تغییرات صورت گرفته در منطقه ریزوسفر است که با ایجاد نواحی تخلیه شده[1] در نزدیکی سطح ریشه گیاهان همراه است. مشاهدات صورت گرفته در مطالعات، نشان داده است که لایه نازکی از آب اطراف تجمعات جلبکی را احاطه می‌نماید. عناصر غذایی موجود در این لایه توسط ریزجانداران واقع در حایشه بیوفیلم مورد استفاده قرار می‌گیرند و لذا، غلظت عناصر غذایی در لایه آب اطرف تجمعات میکروبی کمتر از مقدار این عناصر در محیط خارجی است. بر این اساس، انتقال بیشتر عناصر غذایی در جهت شیب غلظت عناصر غذایی از محیط خارجی به سمت نواحی تخلیه شده، باعث افزایش جذب آنها توسط پریفایتون و نیز کاهش غلظت عناصر در محیط اطراف می‌گردد (Badireddy et al 2010). از سوی دیگر، ظرفیت قابل توجه پریفایتون در جذب عناصر غذایی از محیط خارجی، به توانایی اجزای سازنده لایه‌های زیستی در ایجاد گرانول‌ها نسبت داده شده است. در این مقوله، حضور ریزجانداران با قابلیت سنتز گرانول‌های پلی‌هیدروکسی بوتیرات و نیز پلی‌فسفات‌ها در بیوفیلم پریفایتون، امکان تجمع مقادیر بالایی از عناصر غذایی (به ویژه فسفر) را فراهم می‌سازد (Wu 2016).

تمامی رویکردهای مبتنی بر پریفایتون برای حذف عناصر غذایی از آب‌های آلوده، دارای اصول و مبانی مشابه هستند. در اکثریت غریب به اتفاق این رویکردها، احداث کانال‌هایی که از شرایط لازم برای رشد بهینه لایه‌های زیستی پریفایتون (مانند نور و جریان آب) برخوردار هستند، باعث عبور جریان آب آلوده از منطقه رشد جوامع پریفایتیک می‌گردد. در این راستا، فعالیت طبیعی جوامع زیستی پریفایتیک، در کنار برداشت منظم و دوره‌ای لایه‌های زیستی از کانال‌ها، باعث حذف مقادیر قابل توجه عناصر غذایی از آب غنیِ ورودی می‌شود (Sutherland and Craggs 2017). لازم به ذکر است که بهره‌گیری از سامانه‌های مبتنی بر پریفایتون برای حذف عناصر غذایی، علاوه بر بهبود کیفیت آب، امکان استفاده از عناصر غذایی تجمع یافته درون بیوفیلم‌های برداشت شده را در قالب کودهای آلی، به صورت مستقیم یا فرآوری شده، فراهم می‌سازد (Sutherland et al 2015).

**عوامل موثر بر ظرفیت زیست‌پالایی پریفایتون**

عواملی که بر عملکرد پریفایتون در زیست‌پالایی آلاینده‌ها اثر می‌گذارد، شامل فاکتورهایی است که فعالیت‌های طبیعی لایه‌های زیستی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این راستا، احتمالا بتوان عوامل اصلی همچون رژیم نوری، دما، تغییرات فصلی، غلظت عناصر غذایی، اسیدیته و نیز حضور تنش‌های محیطی (مانند شوری) را بر توانایی پریفایتون در تداوم فعالیت‌های طبیعی خود (مانند تولید EPS)، موثر دانست (Naveed et al 2019). علاوه بر آن، از جمله سایر عواملی که رشد پریفایتون در شرایط تنشی را کنترل می‌نماید و متعاقبا بر ظرفیت این جوامع در زیست‌پالایی اثر می‌گذارد، می‌توان به ویژگی‌های هیدرولیکی (مانند سرعت جریان آب و درجه تلاطم)، حضور شکارچیان، برهمکنش‌های درونی در لایه زیستی، فراهمی دهنده‌ها و گیرنده‌های الکترونی، برهمکنش آلاینده‌های مختلف با یکدیگر و نیز سمیت آلاینده برای اجزای مختلف پریفایتون اشاره نمود (Edwards and Kjellerup 2013; Wu 2016; Furey et al 2019; Naveed et al 2019).

بیوفیلم‌های پریفایتیک از دامنه گسترده‌ای از خصوصیات منحصر به فرد برخوردار هستند که این جوامع زیستی را به ابزاری قدرتمند در رفع آلاینده‌های زیست محیطی تبدیل می‌سازند. در مطالعات مختلف، خصوصیات پریفایتون در سازگاری با شرایط محیطی نامساعد، به صورت پراکنده، مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، گرد هم‌آوری این ویژگی‌ها در کنار یکدیگر و تشریح تاثیر هر کدام بر عملکرد جوامع پریفایتیک، در ایجاد شناخت جامع و نیز ارایه دانش عمیق در خصوص ظرفیت جوامع پریفایتیک در پالایش زیستی ترکیبات آلاینده، مثمر ثمر خواهد بود. در جدول شماره ۲، کلیدی‌ترین ویژگی‌های پریفایتون در تعامل با آلاینده‌ها و شرایط نامساعد محیطی و نیز تفسیری

1. Zones of depletion

از چگونگی اثرگذاری این ویژگی‌ها بر عملکرد و قابلیت پالایندگی پریفایتون، ارایه شده است.

**جدول شماره ۲- تفسیر ویژگی‌های مختلف جوامع پریفایتیک در پالایش زیستی آلاینده‌ها**

| ردیف | ویژگی | عملکرد | منبع |
|---|---|---|---|
| ۱ | کلنیزاسیون انواع بسترها | • استقرار موفق ریزجانداران در محیط‌های آلوده<br>• افزایش سازگاری با شرایط محیطی نامساعد<br>• افزایش مقاومت ریزجانداران به غلظت‌های بالای آلاینده‌ها | Wu, (2016) |
| ۲ | ایجاد بیوفیلم و قابلیت تغییر در ترکیب مواد مترشحه | • محافظت از اجزای میکروبی جامعه زیستی<br>• سازگاری سریع با شرایط محیطی<br>• افزایش مقاومت گروه‌های میکروبی به دامنه گسترده‌ای از آلاینده‌ها | Rummel et al., (2017)<br>Parrish and Fahrenfeld, (2019)<br>Shabbir et al., (2020) |
| ۳ | تعامل و برهمکنش‌های میکروبی درون جامعه زیستی | • تبادل و انتقال افقی ژن‌ها<br>• توزیع فرایندهای متابولیک<br>• اشتراک‌گذاری مسیرهای بیوشیمیایی | Zhou et al., (2013)<br>Perkovic et al., (2022) |
| ۴ | تنوع زیستی بالا در بیوفیلم | • تنوع ژنتیکی<br>• هم‌پوشانی عملکردی<br>• متابولیسم اکتوپیک<br>• افزایش مقاومت و سازگاری با تنش‌های محیطی<br>• حضور توأم گروه‌های فیزیولوژیک مختلف<br>• تعاملات سینتروفیک[1] | Boles et al., (2004)<br>Edwards and Kjellerup, (2013)<br>Zhou et al., (2013) |
| ۵ | قابلیت‌های آنزیمی متنوع | • امکان استفاده از دامنه گسترده‌ای از آلاینده‌ها | Kang et al., (2006)<br>Kurzbaum et al., (2010)<br>Olaniran and igbinosa,( 2011) |
| ۶ | قابلیت‌های خود تنظیمی | • تنظیم فرایندهای داخلی در بیوفیلم<br>• ایستادگی در برابر تغییرات شرایط محیطی | Wu, (2016) |
| ۷ | کانون انجام انواع فعالیت‌های بیوژئوشیمیایی | • شرکت در جابجایی، انتقال و معدنی‌سازی ترکیبات مختلف<br>• تنظیم جذب و شار عناصر عناصر غذایی<br>• شرکت در چرخه‌های عناصر غذایی<br>• مشارکت در تولیدات اولیه و پایداری زیست‌بوم‌ها | Wu, (2016)<br>Rummel et al., (2017) |

**چالش‌ها در زیست‌فناوری مبتنی بر پریفایتون**

غالب مطالعات ارایه شده در زمینه زیست‌فناوری مبتنی بر پریفایتون، بر قابلیت‌ها و توانایی‌های این موجودیت زیستی در حذف آلاینده‌ها یا تشریح چگونگی عملکرد جوامع پریفایتیک در بهبود کیفیت محیط تمرکز داشته است. با وجود این، استفاده از پریفایتون در پالایش زیستی محیط‌های آلوده با برخی از چالش‌ها روبرو است، که به نظر می‌رسد کمتر مورد توجه محققین فعال در این حوزه قرار گرفته است. به منظور افزایش بهره‌وری رویکردهای بکاررفته در استفاده از قابلیت‌های زیستی جوامع پریفایتیک جهت اصلاح مکان‌های آلوده، ابتدا می‌بایست آگاهی لازم و کافی از عوامل محدود کننده و نیز چالش‌های موجود در کاربرد پریفایتون در فرایندهای زیست‌پالایی را ایجاد نمود. در این بخش، برخی از مهم‌ترین چالش‌ها در زیست‌فناوری مبتنی بر پریفایتون ارایه شده است. پرداختن به این چالش‌ها، در ارایه یک دیدگاه نوین، منسجم و کل‌نگر در زمینه کاربرد زیست‌فناورانه پریفایتون مفید خواهد بود.

از جمله مهم‌ترین نگرانی‌ها پیرامون کاربرد پریفایتون، می‌توان به رشد کنترل نشده این جوامع زیستی در منابع آبی اشاره نمود. رشد بیش از حد پریفایتون در منابع آبی، قادر است از طریق ایجاد تغییر در ویژگی‌های شیمیایی و هیدرولیکی، فراهمی عناصر غذایی و آشیان‌های اکولوژیکی و نیز پویایی شبکه غذایی، تعادل و توازن موجود در بوم‌سازگان آبی و غرقاب را تحت تاثیر قرار دهد (Larned 2010). غالب شدن پریفایتون در بوم‌سازگان به ویژه زمانی برای سایر موجودات زنده خطر آفرین است که اجزای تشکیل دهنده بیوفیلم‌های پریفایتیک، از قابلیت تولید توکسین‌ها برخوردار باشند. در این رابطه، توانایی سنتز توکسین‌های مضر توسط انواع سیانوباکترها مانند *Microcoleus* و *Phormidium* گزارش شده است (Furey et al 2019). به شکلی مشابه، حضور سایر باکتری‌ها در بیوفیلم با توانایی تولید متابولیت‌های

1 Synthrophic interactions

سمی همچون متیل جیوه، کاربرد پریفایتون در محیط‌های طبیعی را محدود خواهد کرد.

ضروری است تا پریفایتون مورد استفاده برای اصلاح یک مکان آلوده، از قابلیت استقرار موفق در بوم‌سازگان مورد نظر برخوردار باشد. عدم تطابق بوم‌شناختی میان پریفایتون و بوم‌سازگان، استفاده کارآمد از این جامعه زیستی در پروژه‌های زیست‌پالایی را با شکست روبرو خواهد ساخت. از جمله دیگر جوانب موثر بر موفقیت زیست‌پالایی مبتی بر پریفایتون، می‌توان به حضور و فراوانی ریزجانداران اختصاصی با قابلیت تجزیه زیستیِ آلاینده هدف اشاره نمود. در این خصوص، تعداد پایین ریزجانداران مفید و یا عدم حضور باکتری‌های اختصاصی برای انجام مراحل بیوشیمیایی ضروری در تغییر و تبدیل آلاینده‌ها (Edwards and Kjellerup 2013)، از اجرای موفق فرایند زیست‌پالایی با استفاده از پریفایتون جلوگیری می‌کند. در این خصوص، پیشنهاد می‌شود از طریق انجام مطالعات امکان‌سنجی، نسبت به تولید پریفایتون‌های نوترکیب با قابلیت‌های تقویت شده در حذف آلاینده‌های زیست‌محیطی اقدام گردد.

در اجرای موفق یک پروژه زیست‌پالایی با کاربرد بیوفیلم‌های پریفایتیک، می‌بایست به کارکردهای درونی در لایه‌های زیستی و تاثیر آنها بر کارایی فرایند زیست‌پالایی توجه شود. به عنوان مثال، در یک بیوفیلم بالغ با حجم زیست‌توده قابل توجه، محتمل است که افزایش تولید EPS باعث مسدود شدن منافذ و خلل و فرج موجود در ساختار لایه زیستی گردد. این تغییر در ساختار بیوفیلم، جریان آب و عناصر غذایی (و همچنین آلاینده‌ها) به درون پریفایتون را مختل می‌نماید. همچنین، تحت این شرایط، انتظار می‌رود که ریزجاندارانی که در لایه‌های زیرین بیوفیلم قرار دارند با کمبود عناصر غذایی روبرو شوند (Chen et al 2013). تضعیف لایه‌های زیرینِ بیوفیلم، باعث سست شدن اتصال پریفایتون به سوبسترا می‌گردد و ساختمان بیوفیلم را در معرض متلاشی شدن قرار می‌دهد. برای رفع این مسئله، پیشنهاد می‌شود با رعایت تمهیداتی (مانند استفاده از تغذیه کنندگان پریفایتون یا برداشت‌های دوره‌ای)، زیست‌توده میکروبی پریفایتون را همواره در فاز لگاریتمی نگه داشت.

از جمله دیگر مسائل قابل توجه در خصوص کاربرد پریفایتون در اصلاح مکان‌های آلوده، می‌توان به مقاومت ذاتی این جامعه زیستی در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها اشاره نمود. چنانچه بیوفیلم پریفایتیک آشیانه ریزجانداران بیماری‌زا و مقاوم به آنتی‌بیوتیک باشد، فعالیت‌های خود تنظیمی و خود نگهداریِ فعال در لایه‌های زیستی، باعث افزایش تعداد این ریزجانداران در حضور آنتی‌بیوتیک‌ها می‌شود. بر این اساس، توصیه می‌گردد آنالیزهای لازم برای شناسایی بیماری‌زایی در ریزجانداران موجود در لایه‌های زیستی پریفایتیک، پیش از کاربرد گسترده پریفایتون در محیط‌های طبیعی انجام گیرد. لازم به ذکر است که جذب آلاینده‌ها توسط پریفایتون، بیوفیلم‌ها را در معرض تجمع و نیز بزرگنمایی زیستی قرار می‌دهد. بنابراین، دورریزی یا استفاده مجدد از پریفایتون پس از کاربرد آن در فرایند زیست‌پالایی، می‌بایست با رعایت نکات ایمنی و توجه به سلامت بوم‌سازگان و انسان صورت گیرد. در آخر، باید از تغییر و تبدیل آلاینده‌ها به ترکیبات کاملا بی‌خطر و یا تبدیل آنها به مواد حد واسط با سمیت کمتر، توسط فعالیت‌های پریفایتیک، اطمینان حاصل کرد. چنانچه فعالیت پریفایتون باعث تشدید سمیت ترکیب اولیه شود، امکان بهره‌مندی از آن در زیست‌پالایی وجود نخواهد داشت. این چالش، به ویژه در تجزیه زیستی میکروپلاستیک به ذرات ریزتر (نانوپلاستیک‌ها) حایز اهمیت است.

## نتیجه‌گیری

مرتفع نمودن موثر چالش‌های مربوط به آلودگی محیط زیست، نیازمند روش‌های کارآمد و متکی بر اصول علمی است. در این راستا، بهره‌مندی از ظرفیت ریزجانداران برای تغییر و تبدیل و نیز حذف آلاینده‌های زیست محیطی، یکی از مهم‌ترین رویکردهای ارایه شده برای مقابله با آلاینده‌ها و مدیریت پراکنش آلاینده‌ها در محیط است. کاربرد فناوری‌های زیست‌پالایی، به ویژه در زمانی حائز اهمیت است که امکان استفاده از سایر روش‌های فیزیکی-شیمیایی وجود نداشته باشد و یا اجرای آنها با محدودیت‌های عملیاتی روبرو باشد. در آخرین گفتمان‌ها پیرامون استفاده فناورانه از قابلیت‌های ریزجانداران در راستای پالایش زیستیِ آلاینده‌ها، بر اهمیت بهره‌مندی از ویژگی‌های منحصر به فرد در کنسرسیوم‌های میکروبی (مانند پریفایتون) تاکید شده است. در این مقوله، وجود خصوصیات منحصر به فرد و وقوع فرایندهایی مانند هم‌پوشانی عملکردی، سوخت و ساز اِکتوپیک یا متابولیسم مشترک، تولید مواد پلیمری برون سلولی (EPS) و نیز مفهوم مقاومت القاء شده ناشی از ماده آلاینده (PICT) در لایه‌های زیستی پریفایتیک، این جوامع زیستی را در برابر طیف وسیعی از شرایط محیطی مقاوم می‌سازد و امکان استفاده آنها از دامنه گسترده‌ای از ترکیبات آلاینده را فراهم می‌نماید. بر این اساس، پریفایتون از ظرفیت قابل توجهی در زیست‌پالایی برخوردار است و می‌توان از قابلیت‌های این موجودیت زیستی در حذف برخی از مهم‌ترین آلاینده‌ها، همچون آلاینده‌های آلی پایدار، داروهای شیمیایی، فلزات سنگین، پلیمرهای مصنوعی، میکروپلاستیک‌ها و نیز غلظت‌های بیش از حد عناصر غذایی،

بهره گرفت.

تنوع زیستی و حضور توأم ریزجانداران مختلف از گروه‌های فیزیولوژیک متفاوت در توده زیستی پریفایتون، امکان استفاده جوامع زیستی از سازوکارهای مختلف برای حذف آلاینده‌های محیطی را فراهم می‌سازد. در این خصوص، از جمله کلیدی‌ترین سازوکارهای پریفایتون برای حذف آلاینده‌های پیش گفته، می‌توان به جذب زیستی آلاینده‌ها بر روی EPS، افزایش حلالیت آلاینده‌های آلی از طریق فعالیت سورفکتانتی پلیمرهای برون سلولی، جذب و واجذب آلاینده‌های بر روی گروه‌های عاملیِ مواد پلیمری و دیواره‌های سلولی، تولید و ترشح آنریم‌های اکسیداتیو، متابولیسم مشترک و همزمان چندین ترکیب آلی، تغییر و تبدیل اشکال شیمیایی آلاینده‌ها، به دام انداختن ذرات آلاینده در توده متخلخل پریفایتیک، تجمع آلاینده‌ها در قالب گرانول‌های ذخیره‌ای و نیز حذف کامل آلاینده‌ها از طریق فرایند معدنی‌سازی، اشاره نمود. باید در نظر داشت که بهره‌مندی از ظرفیت‌های پریفایتون به عنوان ابزاری نوآورانه در فناوری‌های زیست‌پالایی نیازمند پاسخگویی به برخی از خلاءهای پژوهشی است، که امکان استفاده پایدار از این موجودیت زیستی با کارایی بالا و با رعایت نکات مربوط به حفظ سلامت محیط زیست فراهم می‌سازد. در این رابطه، به نظر می‌رسد که در حال حاضر، تعداد مطالعات متمرکز بر چگونگی اثرگذاری عوامل خارجی یا محیطی (مانند شدت نور و انواع سوبسترا و آلاینده‌های موجود در محیط) بر فعالیت تجزیه‌کنندگی پریفایتون، برای ایجاد دانش جامع و کامل پیرامون این موجودیت زیستی، محدود است. در این رابطه، تاثیر تغییر در پارامترهای محیطی بر کاهش یا افزایش شدت فعالیت پریفایتون در پالایش زیستی آلاینده‌های مختلف، به طور کامل مشخص نگردیده است. همچنین، قابلیت پریفایتون در حذف توأم بیش از یک آلاینده، کمتر مورد توجه محققین قرار داشته است. شایان ذکر است که در محیط‌های طبیعی، چندین آلاینده مختلف به شکل همزمان در کنار یکدیگر وجود دارند، که این می‌تواند بر شدت آلایندگی هر یک از آنها موثر واقع شود. بنابراین، ضروری است تا محققین، ماهیت ناهمگن محیط‌های طبیعی و تاثیر برهمکنش آلاینده‌های مختلف بر فعالیت پریفایتون را در طراحی آزمایش‌های خود مورد توجه قرار دهند. برخی از مهمترین زمینه‌های پژوهشی برای تحقیقات آینده پیرامون قابلیت‌های زیست‌پالاییِ پریفایتون، در زیر ارایه شده است:

- مطالعه دقیق سینتیک و سازوکارهای آلاینده‌زدایی و تجزیه زیستی توسط پریفایتون.
- بررسی برهمکنش‌های صورت گرفته میان ریزجانداران ساکن لایه‌های زیستی پریفایتیک در واکنش به آلاینده‌های مختلف و غلظت‌های متغیر از یک آلاینده.
- پژوهش پیرامون تغییرات صورت گرفته در خصوصیات EPS تولید شده توسط پریفایتون و ارزیابی اثرات این دسته از تغییرات بر افزایش مقاومت پریفایتون به آلاینده‌ها و بهبود توانایی‌های آن در حذف آلاینده‌ها.
- مطالعه و شناسایی ژنوم ریزجانداران مسئول تجزیه زیستی آلاینده‌ها در بیوفیلم پریفایتیک.
- امکان‌سنجی افزایش کارایی تجزیه زیستی آلاینده‌های توسط پریفایتون از طریق ایجاد پریفایتون‌های نوترکیب.
- بررسی اثر تغییر در پارامترهای محیطی بر ظرفیت پالایندگی پریفایتون.
- مطالعه قابلیت و تشریح سازوکارهای پریفایتون در پالایش زیستی توأم بیش از یک ترکیب آلاینده.

**"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"**

## منابع

امیرحسینی، کامیار و علیخانی، حسینعلی. ۱۴۰۱. مطالعه عملکرد میکروپلاستیک‌ها به عنوان بستری نوین برای استقرار و تکثیر لایه‌های زیستی پریفایتیک و کاهش آلودگی زیست‌محیطی آنها در شالزارها. *پایان نامه کارشناسی ارشد*. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

حقانی، زهرا و علیخانی، حسینعلی. ۱۴۰۱. مطالعه امکان استفاده از انواع بومی پریفایتون‌های نوترکیب شده در افزایش رشد و عملکرد برنج در شالیزارها. *پایان نامه کارشناسی ارشد*. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

علیخانی، حسینعلی؛ امامی، سمیه و اعتصامی، حسن. ۱۴۰۰. پریفایتون و نقش کلیدی آن در شالیزار ها و سلامت محیط زیست. *تحقیقات آب و خاک ایران*، دوره ۵۲، شماره ۲.

**REFERENCES**


Alexander, M. (1999). Biodegradation and Bioremediation. *Academic Press San Diego CA*. Biodegradation and bioremediation.

Alikhani, H. A., Emami, S., & Etesami, H. (2021). Periphyton and Its Key Role in Paddy Fildes and Environmental Health. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(2), 451-467. (In Persian)

Amirhosseini, K., & Alikhani, H.A. (2022). Study of the function of microplastics as novel substrates for establishment and proliferation of periphytic biofilms and alleviation of its environmental contamination in rice fields. *Master's degree thesis*. Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. (In Persian)

Badireddy, A. R., Chellam, S., Gassman, P. L., Engelhard, M. H., Lea, A. S., & Rosso, K. M. (2010). Role of extracellular polymeric substances in bioflocculation of activated sludge microorganisms under glucose-controlled conditions. *Water Research*, 44(15), 4505-4516.

Bhakta, J. N., Munekage, Y., Ohnishi, K., & Jana, B. B. (2012). Isolation and identification of cadmium-and lead-resistant lactic acid bacteria for application as metal removing probiotic. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 433-440.

Blanck, H., Eriksson, K. M., Grönvall, F., Dahl, B., Guijarro, K. M., Birgersson, G., & Kylin, H. (2009). A retrospective analysis of contamination and periphyton PICT patterns for the antifoulant irgarol 1051, around a small marina on the Swedish west coast. *Marine pollution bulletin*, 58(2), 230-237.

Boles, B. R., Thoendel, M., & Singh, P. K. (2004). Self-generated diversity produces "insurance effects" in biofilm communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(47), 16630-16635.

Bonefeld-Jorgensen, E. C., Hjelmborg, P. S., Reinert, T. S., Andersen, B. S., Lesovoy, V., Lindh, C. H., ... & Bonde, J. P. (2006). Xenoestrogenic activity in blood of European and Inuit populations. *Environmental Health*, 5, 1-12.

Boopathy, R. (2000). Factors limiting bioremediation technologies. *Bioresource technology*, 74(1), 63-67.

Borah, D., Nainamalai, S., Gopalakrishnan, S., Rout, J., Alharbi, N. S., Alharbi, S. A., & Nooruddin, T. (2018). Biolubricant potential of exopolysaccharides from the cyanobacterium Cyanothece epiphytica. *Applied microbiology and biotechnology*, 102, 3635-3647.

Bradac, P., Wagner, B., Kistler, D., Traber, J., Behra, R., & Sigg, L. (2010). Cadmium speciation and accumulation in periphyton in a small stream with dynamic concentration variations. *Environmental Pollution*, 158(3), 641-648.

Chen, B., Li, F., Liu, N., Ge, F., Xiao, H., & Yang, Y. (2015). Role of extracellular polymeric substances from Chlorella vulgaris in the removal of ammonium and orthophosphate under the stress of cadmium. *Bioresource technology*, 190, 299-306.

Chen, X., Suwarno, S. R., Chong, T. H., McDougald, D., Kjelleberg, S., Cohen, Y., ... & Rice, S. A. (2013). Dynamics of biofilm formation under different nutrient levels and the effect on biofouling of a reverse osmosis membrane system. *Biofouling*, 29(3), 319-330.

Cho, Y. M., Ghosh, U., Kennedy, A. J., Grossman, A., Ray, G., Tomaszewski, J. E., ... & Luthy, R. G. (2009). Field application of activated carbon amendment for in-situ stabilization of polychlorinated biphenyls in marine sediment. *Environmental science & technology*, 43(10), 3815-3823.

Choi, A., Wang, S., & Lee, M. (2009). Biosorption of cadmium, copper, and lead ions from aqueous solutions by Ralstonia sp. and Bacillus sp. isolated from diesel and heavy metal contaminated soil. *Geosciences Journal*, 13, 331-341.

Conrad, H. E., Hedegaard, J., Gunsalus, I. C., Corey, E. J., & Uda, H. (1965). Lactone intermediates in the microbial oxidation of (+)-camphor. *Tetrahedron Letters*, 6(10), 561-565.

Conrad, M. E., Brodie, E. L., Radtke, C. W., Bill, M., Delwiche, M. E., Lee, M. H., ... & Colwell, F. S. (2010). Field evidence for co-metabolism of trichloroethene stimulated by addition of electron donor to groundwater. *Environmental Science & Technology*, 44(12), 4697-4704.

Debenest, T., Pinelli, E., Coste, M., Silvestre, J., Mazzella, N., Madigou, C., & Delmas, F. (2009). Sensitivity of freshwater periphytic diatoms to agricultural herbicides. *Aquatic toxicology*, 93(1), 11-17.

Decho, A. W., & Gutierrez, T. (2017). Microbial extracellular polymeric substances (EPSs) in ocean systems. *Frontiers in microbiology*, 8, 922.

DeLorenzo, V. (2018). Biodegradation and bioremediation: an introduction. Consequences of microbial Interactions with hydrocarbons, oils, and lipids: biodegradation and bioremediation. *Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology*. Springer, Cham, Switzerland, 1-21.

Diels, L., Spaans, P. H., Van Roy, S., Hooyberghs, L., Ryngaert, A., Wouters, H., ... & Tsezos, M. (2003). Heavy metals removal by sand filters inoculated with metal sorbing and precipitating

bacteria. *Hydrometallurgy*, 71(1-2), 235-241.
Duong, T. T., Morin, S., Herlory, O., Feurtet-Mazel, A., Coste, M., & Boudou, A. (2008). Seasonal effects of cadmium accumulation in periphytic diatom communities of freshwater biofilms. *Aquatic toxicology*, 90(1), 19-28.
Edwards, S. J., & Kjellerup, B. V. (2013). Applications of biofilms in bioremediation and biotransformation of persistent organic pollutants, pharmaceuticals/personal care products, and heavy metals. *Applied microbiology and biotechnology*, 97, 9909-9921.
EPA, U. (2005). Contaminated sediment remediation guidance for hazardous waste sites. *Office of Solid Waste and Emergency Response*.
Faheem, M., Shabbir, S., Zhao, J., G Kerr, P., Ali, S., Sultana, N., & Jia, Z. (2020a). Multifunctional Periphytic Biofilms: Polyethylene Degradation and Cd2+ and Pb2+ Bioremediation under High Methane Scenario. *International journal of molecular sciences*, 21(15), 5331.
Faheem, M., Shabbir, S., Zhao, J., Kerr, P. G., Sultana, N., & Jia, Z. (2020b). Enhanced adsorptive bioremediation of heavy metals (Cd2+, Cr6+, Pb2+) by methane-oxidizin g epipelon. *Microorganisms*, 8(4), 505.
Freilich, S., Zarecki, R., Eilam, O., Segal, E. S., Henry, C. S., Kupiec, M., ... & Ruppin, E. (2011). Competitive and cooperative metabolic interactions in bacterial communities. *Nature communications*, 2(1), 1-7.
Fu, Z., & Xi, S. (2020). Toxicology Mechanisms and Methods. *Taylor and Francis* Ltd. https://doi. org/10.1080/15376516.2019, 1701594.
Furey, P. C., Liess, A., & Lee, S. (2019). Substratum-associated microbiota. *Water Environment Research*, 91(10), 1326-1341.
Gil-Allué, C., Tlili, A., Schirmer, K., Gessner, M. O., & Behra, R. (2018). Long-term exposure to silver nanoparticles affects periphyton community structure and function. *Environmental Science: Nano*, 5(6), 1397-1407.
Guasch, H., Admiraal, W., & Sabater, S. (2003). Contrasting effects of organic and inorganic toxicants on freshwater periphyton. *Aquatic toxicology*, 64(2), 165-175.
Gunsalus, I. C., Gunsalus, C. F., & Stanier, R. Y. (1953). The enzymatic conversion of mandelic acid to benzoic acid I: Gross fractionation of the system into soluble and particulate components. *Journal of Bacteriology*, 66(5), 538-542.
Ha, J., Engler, C. R., & Wild, J. R. (2009). Biodegradation of coumaphos, chlorferon, and diethylthiophosphate using bacteria immobilized in Ca-alginate gel beads. *Bioresource Technology*, 100(3), 1138-1142.
Haghani, Z., Amirhosseini, K., & Alikhani, H. A. (2021). Study on the possibility of using native types of new-combinant periphyton in increasing the growth and yield of rice in paddy fields. *Master's degree thesis*. Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. (In Persian)
Havugimana, E. R. N. E. S. T. E., Bhople, B. S., Kumar, A. N. I. L., Byiringiro, E. M. M. A. N. U. E. L., Mugabo, J. P., & Kumar, A. R. U. N. (2017). Soil pollution–major sources and types of soil pollutants. *Environmental science and engineering*, 11, 53-86.
Holding, K. L., Gill, R. A., & Carter, J. (2003). The relationship between epilithic periphyton (biofilm) bound metals and metals bound to sediments in freshwater systems. *Environmental Geochemistry and Health*, 25, 87-93.
Hu, E., Shang, S., Tao, X. M., Jiang, S., & Chiu, K. L. (2016). Regeneration and reuse of highly polluting textile dyeing effluents through catalytic ozonation with carbon aerogel catalysts. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1055-1065.
Jacquin, J., Cheng, J., Odobel, C., Pandin, C., Conan, P., Pujo-Pay, M., ... & Ghiglione, J. F. (2019). Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the "Plastisphere". *Frontiers in Microbiology*, 10, 865.
Jang, M. S., Lee, Y. M., Kim, C. H., Lee, J. H., Kang, D. W., Kim, S. J., & Lee, Y. C. (2005). Triphenylmethane reductase from Citrobacter sp. strain KCTC 18061P: purification, characterization, gene cloning, and overexpression of a functional protein in Escherichia coli. *Applied and environmental microbiology*, 71(12), 7955-7960.
Johnsen, A. R., & Karlson, U. (2004). Evaluation of bacterial strategies to promote the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Applied microbiology and biotechnology*, 63, 452-459.
Kang, J. H., Katayama, Y., & Kondo, F. (2006). Biodegradation or metabolism of bisphenol A: from microorganisms to mammals. *Toxicology*, 217(2-3), 81-90.
Kazamia, E., Czesnick, H., Nguyen, T. T. V., Croft, M. T., Sherwood, E., Sasso, S., ... & Smith, A. G. (2012).

Mutualistic interactions between vitamin B12-dependent algae and heterotrophic bacteria exhibit regulation. *Environmental microbiology*, 14(6), 1466-1476.

Kostel, J. A., Wang, H., Amand, A. L. S., & Gray, K. A. (1999). 1. Use of a novel laboratory stream system to study the ecological impact of PCB exposure in a periphytic biolayer. *Water Research*, 33(18), 3735-3748.

Kurzbaum, E., Kirzhner, F., Sela, S., Zimmels, Y., & Armon, R. (2010). Efficiency of phenol biodegradation by planktonic Pseudomonas pseudoalcaligenes (a constructed wetland isolate) vs. root and gravel biofilm. *Water research*, 44(17), 5021-5031.

Larned, S. T. (2010). A prospectus for periphyton: recent and future ecological research. *Journal of the North American Benthological Society*, 29(1), 182-206.

Lewis, S. L., & Maslin, M. A. (2015). Defining the anthropocene. *Nature*, 519(7542), 171-180.

Li, Y., Zhang, P., Wang, L., Wang, C., Zhang, W., Zhang, H., ... & Li, W. (2019). Microstructure, bacterial community and metabolic prediction of multi-species biofilms following exposure to di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP). *Chemosphere*, 237, 124382.

Liu, S. Y., Leung, M. M. L., Fang, J. K. H., & Chua, S. L. (2021). Engineering a microbial 'trap and release'mechanism for microplastics removal. *Chemical Engineering Journal*, 404, 127079.

Lolas IB, Chen X, Bester K, Nielsen JL (2012) Identification of triclosan-degrading bacteria using stable isotope probing, fluo- rescence in situ hybridization and microautoradiography. *Microbiol* 158:2796–2804

Lombardi, A. T., Vieira, A. A., & Sartori, L. A. (2002). Mucilaginous capsule adsorption and intracellular uptake of copper by Kirchneriella aperta (Chlorococcales). *Journal of Phycology*, 38(2), 332-337.

Lopez, A. R., Silva, S. C., Webb, S. M., Hesterberg, D., & Buchwalter, D. B. (2018). Periphyton and abiotic factors influencing arsenic speciation in aquatic environments. *Environmental toxicology and chemistry*, 37(3), 903-913.

Mackay, A. W., Felde, V. A., Morley, D. W., Piotrowska, N., Rioual, P., Seddon, A. W., & Swann, G. E. (2022). Long-term trends in diatom diversity and palaeoproductivity: a 16 000-year multidecadal record from Lake Baikal, southern Siberia. *Climate of the Past*, 18(2), 363-380.

Magnusson, M., Heimann, K., Ridd, M., & Negri, A. P. (2012). Chronic herbicide exposures affect the sensitivity and community structure of tropical benthic microalgae. *Marine Pollution Bulletin*, 65(4-9), 363-372.

McCormick, A., Hoellein, T. J., Mason, S. A., Schluep, J., & Kelly, J. J. (2014). Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river. *Environmental science & technology*, 48(20), 11863-11871.

Merchant, S. S., & Helmann, J. D. (2012). Elemental economy: microbial strategies for optimizing growth in the face of nutrient limitation. *Advances in microbial physiology*, 60, 91-210.

Miao, A. J., Schwehr, K. A., Xu, C., Zhang, S. J., Luo, Z., Quigg, A., & Santschi, P. H. (2009). The algal toxicity of silver engineered nanoparticles and detoxification by exopolymeric substances. *Environmental pollutio*n, 157(11), 3034-3041.

Miao, L., Hou, J., You, G., Liu, Z., Liu, S., Li, T., ... & Qu, H. (2019b). Acute effects of nanoplastics and microplastics on periphytic biofilms depending on particle size, concentration and surface modification. *Environmental Pollution*, 255, 113300.

Mohite, B. V., Koli, S. H., Narkhede, C. P., Patil, S. N., & Patil, S. V. (2017). Prospective of microbial exopolysaccharide for heavy metal exclusion. *Applied biochemistry and biotechnology*, 183, 582-600.

Nava, V., & Leoni, B. (2021). A critical review of interactions between microplastics, microalgae and aquatic ecosystem function. *Water research*, 188, 116476.

Naveed, S., Li, C., Lu, X., Chen, S., Yin, B., Zhang, C., & Ge, Y. (2019). Microalgal extracellular polymeric substances and their interactions with metal (loid) s: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(19), 1769-1802.

Olaniran, A. O., & Igbinosa, E. O. (2011). Chlorophenols and other related derivatives of environmental concern: properties, distribution and microbial degradation processes. *Chemosphere*, 83(10), 1297-1306.

Ozturk, S., Aslim, B., & Suludere, Z. (2010). Cadmium (II) sequestration characteristics by two isolates of Synechocystis sp. in terms of exopolysaccharide (EPS) production and monomer composition. *Bioresource Technology*, 101(24), 9742-9748.

Parrish, K., & Fahrenfeld, N. L. (2019). Microplastic biofilm in fresh-and wastewater as a function of microparticle type and size class. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 5(3), 495-505.

Perelo, L. W. (2010). In situ and bioremediation of organic pollutants in aquatic sediments. *Journal of*

*hazardous materials*, 177(1-3), 81-89.
Perković, L., Djedović, E., Vujović, T., Baković, M., Paradžik, T., & Čož-Rakovac, R. (2022). Biotechnological Enhancement of Probiotics through Co-Cultivation with Algae: Future or a Trend?. *Marine Drugs*, 20(2), 142.
Prosser, R. S., Brain, R. A., Hosmer, A. J., Solomon, K. R., & Hanson, M. L. (2013). Assessing sensitivity and recovery of field-collected periphyton acutely exposed to atrazine using PSII inhibition under laboratory conditions. *Ecotoxicology*, 22(9), 1367-1383
Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2018). Soil pollution: a hidden reality. *FAO*.
Rummel, C. D., Jahnke, A., Gorokhova, E., Kühnel, D., & Schmitt-Jansen, M. (2017). Impacts of biofilm formation on the fate and potential effects of microplastic in the aquatic environment. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(7), 258-267.
Samuelsson, G. S. (2013). In situ remediation of contaminated sediments using thin-layer capping: efficiency in contaminant retention and ecological implications (*Doctoral dissertation*, Department of Ecology, Environment and Plant Sciences, Stockholm University).
Serra, A., Corcoll, N., & Guasch, H. (2009). Copper accumulation and toxicity in fluvial periphyton: the influence of exposure history. *Chemosphere*, 74(5), 633-641.
Shabbir, S., Faheem, M., & Wu, Y. (2018). Decolorization of high concentration crystal violet by periphyton bioreactors and potential of effluent reuse for agricultural purposes. *Journal of Cleaner Production*, 170, 425-436.
Shabbir, S., Faheem, M., Ali, N., Kerr, P. G., & Wu, Y. (2017). Evaluating role of immobilized periphyton in bioremediation of azo dye amaranth. *Bioresource Technology*, 225, 395-401.
Shabbir, S., Faheem, M., Ali, N., Kerr, P. G., Wang, L. F., Kuppusamy, S., & Li, Y. (2020). Periphytic biofilm: An innovative approach for biodegradation of microplastics. *Science of the Total Environment*, 717, 137064.
Shabbir, S., Faheem, M., Dar, A. A., Ali, N., Kerr, P. G., Yu, Z. G., ... & Gilfedder, B. S. (2022). Enhanced periphyton biodegradation of endocrine disrupting hormones and microplastic: Intrinsic reaction mechanism, influential humic acid and microbial community structure elucidation. *Chemosphere*, 293, 133515.
Sheng, G. P., Yu, H. Q., & Li, X. Y. (2010). Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review. *Biotechnology advances*, 28(6), 882-894.
Steffan, R. J. (2019). Developing Bioremediation Technologies for Commercial Application: An Insider's View. *Consequences of Microbial Interactions with Hydrocarbons, Oils, and Lipids: Biodegradation and Bioremediation*, 21-32.
Stubbendieck, R. M., & Straight, P. D. (2016). Multifaceted interfaces of bacterial competition. *Journal of bacteriology*, 198(16), 2145-2155.
Sutherland, D. L., & Craggs, R. J. (2017). Utilising periphytic algae as nutrient removal systems for the treatment of diffuse nutrient pollution in waterways. *Algal research*, 25, 496-506.
Sutherland, D. L., Howard-Williams, C., Turnbull, M. H., Broady, P. A., & Craggs, R. J. (2015). Enhancing microalgal photosynthesis and productivity in wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource technology*, 184, 222-229.
Tlili, A., Bérard, A., Roulier, J. L., Volat, B., & Montuelle, B. (2010). PO43− dependence of the tolerance of autotrophic and heterotrophic biofilm communities to copper and diuron. *Aquatic Toxicology*, 98(2), 165-177.
Tlili, A., Dorigo, U., Montuelle, B., Margoum, C., Carluer, N., Gouy, V., ... & Bérard, A. (2008). Responses of chronically contaminated biofilms to short pulses of diuron: an experimental study simulating flooding events in a small river. *Aquatic Toxicology*, 87(4), 252-263.
Wu, Y. (2016). Periphyton: functions and application in environmental remediation. *Elsevier*.
Yokota, K., Waterfield, H., Hastings, C., Davidson, E., Kwietniewski, E., & Wells, B. (2017). Finding the missing piece of the aquatic plastic pollution puzzle: interaction between primary producers and microplastics. *Limnology and Oceanography Letters*, 2(4), 91-104.
Zhou, J., Liu, W., Deng, Y., Jiang, Y. H., Xue, K., He, Z., ... & Wang, A. (2013). Stochastic assembly leads to alternative communities with distinct functions in a bioreactor microbial community. *MBio*, 4(2), e00584-12.

# Utilizing Periphyton as an Innovative Biotechnology in Pollutants Removal

## EXTENDED ABSTRACT

**Background and aim**

Efficient removal of environmental pollutants in a sustainable and eco-friendly manner demands innovative approaches relying on sound science. Various physico-chemcial approaches have been put forward to alleviate the pollution problem but many of these have practical limitations due to high implementation costs, toxic by-product formation, and redistribution of pollutants in the environment. Biological and microbiological approaches, on the other hand, offer more economically-viable and environmentally sustainable alternatives to manage pollutants. Microorganisms have immense potential to remove pollutants or transform recalcitrant xenobiotics into less toxic chemical species. Recent paradigms in the science of biodegradation and recent developments in bioremediation technologies urge the utilization of microbial consortia to effectively remove a wide array of environmental pollutants instead of employing single microbial species. Periphyton—a complex, inter-connected, and biofilm-forming biological community of micro and macroorganisms inhabiting wetland ecosystems—has been shown to interact with various critical pollutants and contribute to their biodegradation. The paper aims to highlight the biological processes employed by the periphytic community to remove organic pollutants, pharmaceuticals, heavy metals, microplastics, and excess nutrients. The study also discusses periphytic biofilm formation and their response mechanisms to pollution.

**Methodology**

The present paper reviews the related literature to compile comprehensively the most essential and recent understanding of the interaction between periphyton and environmental pollutants. The article also describes the mechanisms employed by the periphytic biofilm in pollutant removal, addresses common challenges in periphyton-based bioremediation, and outlines research gaps for future studies. These findings prove helpful in developing periphyton-derived bioremediation technologies.

**Findings**

The periphytic community is an integral and dynamic component of the wetland ecosystem, responding quickly to external stimuli. The community's structural composition and biochemical processes change according to the prevailing surrounding conditions and the presence of pollutants. Periphyton uses various mechanisms to adapt to pollution and enable biodegradation. The unique characteristics and processes in the periphyton biological community that make it a powerful biodegradation agent include functional redundancy, ectopic or co-metabolism, extracellular polymeric substances synthesis, and pollutant-induced community tolerance. Moreover, the three-dimensional shape, porous nature, and voids in biofilms' structure enhance pollutants' bioadsorption and accumulation within the biofilm, removing them from the external environment. As such, studies have confirmed the considerable capacity of periphytic biofilms to remove organic pollutants, pharmaceuticals, heavy metals, microplastics, and excess nutrients from the environment.

**Conclusion**

Periphyton-based bioremediation represents an innovative approach to managing environmental pollution. Although periphytic biofilms interact dynamically with living and non-living agents in their exterior and can alleviate environmental pollution via biosorption, assimilation, and biodegradation processes, effective and sustainable utilization of periphyton in bioremediation technologies demands the scientific community's awareness of current bottlenecks and research gaps. Most importantly, attention needs to be given to controlling the growth of periphytic biofilms in a given ecosystem, increasing biofilms colonization potential and successful establishment in a new ecosystem, creating functionally-enriched periphyton with enhanced capacity in removing target pollutants, and safe and eco-friendly post-bioremediation disposal or reuse of periphyton.

**Keywords: Biofilm, Bioremediation, Decontamination, Environmental Pollution, Periphyton.**