



<https://bjm.ui.ac.ir/?lang=en>

Journal of Microbial Biology
E-ISSN: 3060-7647
13th Year, Vol. 13, No. 50, Summer 2024 pp. 41-56
Received: 31/12/2023 Accepted: 08/05/2024

(Review Paper)

Applications of corrosion-causing bacteria in cleaning environmental pollutants (chemical compounds, pesticides, detergents, plastics)

Rouha Kasra Kermanshahi * 

Professor of Microbiology, Alzahra University, Tehran, Iran
rkasra@yahoo.com

Elahe Mobarak Qamsari

Assistant professor of Microbiology, Alzahra University, Tehran, Iran
e.mobarak@alzahra.ac.ir

Abstract

Human activities, such as production and consumption, generate waste that pollutes environment. This pollution creates unfavorable conditions for humans and other living beings. Microorganisms, however, offer potential solutions. These tiny can be both beneficial and harmful to humans. While their negative aspects, like pathogenicity or corrosion, have been exclusively studied, this review focuses on the positive potential of these often-threatened bacteria. Here, we explore their ability to clean and biodegrade environmental pollutants. The review draws on research conducted by the authors and other researchers, examining how bacteria responsible for corrosion can biodegrade and purify various pollutants such as PCP, pesticides, detergents, and even bioplastics. Since the biodegradation pathways for these pollutants have been identified and their safety for living organisms considered, the use of such bacteria for environmental cleaning is recommended.

Keywords: Microbial corrosion, Biodegradation, Pollutants, Pesticides, Detergents, Bioplastics.

* Corresponding Author

3060-7647 © 2024 The Authors

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Kermanshahi R.K., Mobarak Qamsari E. Applications of corrosion-causing bacteria in cleaning environmental pollutants (chemical compounds, pesticides, detergents, plastics). *Journal of Microbial Biology*, 2024; 13 (50): 41-56.
<http://dx.doi.org/10.22108/BJM.2024.140287.1577>



Introduction

Pollutants are usually caused by human activities. In other words, the result of production and consumption creates more waste, which causes environmental issues and unfavorable conditions for humans and living beings. In bioremediation, microorganisms are used to break down organic molecules and convert them into simpler compounds, which may reduce the toxicity of pollutants. A number of microorganisms can biodegrade hazardous chemicals. These materials are then used for their growth and metabolism. This article discusses the biodegradation of these pollutants by corrosive bacteria. Microbial corrosion is a major problem in industries, leading to high repair and replacement costs. Extensive studies have been done in the field of biological and microbiological corrosion. Iron oxidizing bacteria and sulfate oxidizing bacteria (SOB) are among the effective aerobic bacteria involved in microbial corrosion. Additionally, the genus *Pseudomonas* and other bacteria that produce adhesive enamel layers play an important role in aerobic corrosion. Considering the special metabolic characteristics of corrosive bacteria such as iron bacteria and types of SRB bacteria, the ability of these bacteria to biodegrade environmental pollutants is a very interesting issue that has not given much attention. Therefore, this review article discusses the positive capability of corrosion-causing bacteria for cleaning and biodegradation of a number of organic environmental pollutants.

Material and Methods

In this review study, articles related to the biodegradation of chemical pollutants in the environment were identified from various databases. Selection criteria included relevance to the study purpose, the quality of the presented material, and the availability of necessary data within the articles.

Results

The study found that corrosive bacteria can biodegrade and purify various pollutants, including Pentachlorophenol (PCP), pesticides, detergents, and bioplastics.

PCP, a widely used pesticide and wood preservative due to its effectiveness against bacteria, can be broken down anaerobically (in the absence of oxygen) through a series of reductive reactions. This process ultimately converts PCP into phenol, which can be further degraded by anaerobic bacteria into methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). Several bacterial genera, including *Desulfitobacterium*, *Dehalobacter*, *Anaeromyxobacter*, *Geobacter*, *Desulfomonile*, *Desulfuromonas*, *Desulfovibrio*, *Sulfurospirillum*, *Dehalogenimonas*, *Dehalobium*, and *Dehalococcoides*, have been identified for their ability to decompose PCP anaerobically. Nitriles that have one or more cyanide (CN) functional groups are highly toxic, carcinogenic, and mutagenic compounds produced both biologically and chemically. They enter surface and groundwater through factory discharges. Additionally, they are used in the manufacture of acrylic fibers in the form of acrylonitrile, sometimes together with silver and titanium nanoparticles for the textile industry. These fibers then enter the environment after use or disposal. A study found that these fibers have a detrimental effect on beneficial soil bacteria such as *Bacillus* species (important for cellulase production) and *Rhizobium* (essential for nitrogen fixation), destroying them. Therefore, microorganisms that produce nitrile-decomposing enzymes, such as nitrilase enzymes produced by *Klebsiella*, *Alkaligenes faecalis*, *Pseudomonas fluorescens*, and *Pseudomonas putida*, can be a solution.

Amidase enzymes act on nitrile compounds and converts them into corresponding acid and ammonia. While some of these bacteria can cause corrosion, this study proposes their use as biodegraders of nitrile-containing materials.

Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) is a colorless, tasteless, and nearly odorless crystalline organochlorine compound. Originally developed as an insecticide, DDT became infamous for its detrimental environmental effects. Under anaerobic conditions, the first stage of DDT degradation involves the production of 1,1-dichloro-2,2(4-chlorophenyl)ethylene DDE. This process differs in aerobic environments. Several bacteria play a role in at least one stage of DDT degradation. These bacteria, including aerobes and facultative anaerobes like *Alcaligenes denitrificans* ITRC-4, *Shewanella decolorationis* S12, *Bacillus cereus*, *Pseudomonas putida*, *Serratia marcescens* DT-1P, are also known to cause corrosion. Additionally, strict anaerobes such as methanogenic granular sludge and *Clostridium* contribute to the degradation process.


Sodium dodecyl sulfate (SDS), a key surfactant compound, is widely used in detergents, shampoos, laundry soaps, and toothpastes. It breaks down quickly under aerobic conditions, a crucial step in its initial and final Microbial degradation. Alkyl sulfatases, enzymes primarily produced by Gram-negative bacteria, effectively decompose alkyl sulfates. However, two Gram-positive bacteria, *Bacillus cereus* and *Coryneform* B1a, can also produce this enzyme and degrade SDS. Detergent-decomposing bacteria are predominantly Gram-negative, including *Enterobacter*, *Proteus*, *Vibrio*, *Klebsiella*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Shigella*, and *Escherichia*. Notably, the Gram-positive bacterium *Bacillus cereus* has been identified to decompose SDS from separation effluent.

Recent legal efforts to restrict non-degradable plastic disposal have driven the plastic industry to seek out more environmentally friendly alternatives. These include light-degradable plastics, plastics with starch content, and microbial plastics. Polyhydroxyalkanoates (PHAs), with the polybeta-hydroxybutyrate (PHB) as the most well-known example, are a promising class of bioplastics. PHB is a homopolymer of 3-hydroxybutyrate and can be extracted from a wide range of microorganisms, including species within the genera *Syntrophomonas*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, and *Clostridium*. However, not all microorganisms produce PHB. Bacteria can completely degrade PHB into harmless byproducts like water and carbon dioxide. This natural degradability, originating from the PHA source, makes them valuable for medical applications. While some bacteria capable of plastic biodegradation, such as *Pseudomonas putida* and *Bacillus cereus*, can be corrosive, the potential for plastic recycling using these microbes is still being explored.

Discussion and conclusion

This study investigates the biodegradation potential for certain corrosion-causing bacteria for environmental pollutants including polychlorinated biphenyls (PCB), acrylonitriles, pesticides, detergents, and plastics. While these bacteria can be beneficial for pollutant degradation, their application requires careful consideration. The suitability of these bacteria depends on factors like environmental conditions, deployment location, and bacterial strain selection. Crucially, the intermediate products from during the biodegradation pathway must be identified and confirmed as non-toxic to living organisms and beneficial microbes. Furthermore, for large-scale implementation, the cost-effectiveness of mass and industrial production of these bacteria needs to be evaluated.

کاربرد باکتری‌های عامل خوردگی در پاکسازی آلاینده‌های محیط زیست (ترکیبات شیمیایی، آفت‌کش‌ها، شوینده‌ها و پلاستیک‌ها)

روح‌ا کسرای کرمانشاهی*  : استاد، گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه الزهراء(س)، تهران، ایران rkasra@yahoo.com
الهه مبارک قمصری: استادیار، گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه الزهراء(س)، تهران، ایران e.mobarak@alzahra.ac.ir

چکیده

آلاینده‌ها معمولاً بر اثر فعالیت‌های انسان ایجاد می‌شوند. به عبارتی پیامد تولید و مصرف، پسماندهای زیاده‌تری را به وجود می‌آورد که در ارتباط با مسائل زیست‌محیطی مشکلاتی را موجب می‌شوند که سبب شرایط نامطلوب در زندگی انسان و موجودات زنده می‌شود. همچنین، میکروارگانیسم‌ها یکی از راه‌حل‌های این مشکلات هستند. این موجودات ریز در ارتباط با انسان دو نوع فعالیت را بروز می‌دهند؛ فعالیت‌های مفید مانند تجزیه زیستی آلاینده‌ها و فعالیت‌های مضر مانند بیماری‌زایی یا خوردگی میکروبی در صنایع مختلف. در این مقاله مروری، توانمندی مثبت باکتری‌های عامل خوردگی که تهدید محسوب می‌شوند، به‌عنوان فرصتی برای پاکسازی و تجزیه زیستی تعدادی از آلاینده‌های آلی محیط زیست بررسی می‌شود. در این مطالعه مروری که در سال‌های اخیر انجام شده است، تعدادی از مقالات مربوط به تحقیقات انجام‌شده توسط نویسندگان مقاله و کارمندان دیگر در زمینه تجزیه زیستی تعدادی از آلاینده‌های آلی محیط زیست در پایگاه‌های اطلاعاتی استفاده شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند باکتری‌های عامل خوردگی، توانایی تجزیه زیستی و پاکسازی آلاینده‌های شیمیایی (PCP)، آفت‌کش‌ها، شوینده‌ها و ساخت زیست‌پلاستیک‌ها را دارند. با توجه به اینکه مسیرهای تجزیه زیستی آلاینده‌های مزبور شناسایی شده‌اند و بی‌خطر بودن آن‌ها برای موجودات زنده مدنظر بوده است، استفاده از این نوع باکتری‌ها برای پاکسازی محیط زیست پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خوردگی میکروبی، تجزیه زیستی، آلاینده‌ها، آفت‌کش‌ها، شوینده‌ها، زیست‌پلاستیک



مقدمه

امروزه آلودگی محیط زیست از مسائل مهمی است که جوامع مختلف با آن مواجه‌اند. آلودگی عبارت است از هرگونه تغییر در خصوصیات اجزای تشکیل‌دهنده محیط؛ به طوری که نتوان از آن استفاده کرد و به طور مستقیم یا غیرمستقیم منافع و حیات موجودات زنده را به مخاطره می‌اندازد (۱). آلاینده‌ها معمولاً در اثر فعالیت‌های انسان پدید می‌آیند و وارد محیط زیست می‌شوند. آلاینده‌های آلی دارای اثرات مضر و مخرب زیست‌محیطی گسترده‌ای هستند و از انواع آنها می‌توان سموم ارگانوکلره و فسفره و ترکیبات پلی کلره بی‌فیل (PCBs) را نام برد که حین فرایندهای تولید، عمل‌آوری و مصرف یا دفع (سوزاندن) وارد محیط زیست می‌شوند (۲). پاره‌ای از مواد شیمیایی نظیر آکریلونیتریل، آفت‌کش‌ها (DDT) و شوینده‌ها (SDS) به علت مشکلاتی که به وجود می‌آورند بسیار حائز اهمیت هستند (۳، ۴).

فرایند استفاده هوشمندانه از فرایندهای زیستی برای به حداقل رساندن یک اثر زیست‌محیطی نامطلوب و حذف یک آلاینده از محیط، زیست‌پالایی نامیده می‌شود. در زیست‌پالایی از میکروارگانیسم‌ها در تجزیه مولکول‌های آلی و تبدیل آنها به ترکیبات ساده‌تر استفاده می‌شود که ممکن است در طی این عمل، سمیت آلاینده‌ها نیز کاهش یابد. تعدادی از میکروارگانیسم‌ها توانایی تجزیه زیستی مواد شیمیایی مخاطره‌آمیز را دارند؛ به طوری که از این مواد برای رشد و متابولیسم خود استفاده می‌کنند. در این مقاله تجزیه زیستی این آلاینده‌ها توسط باکتری‌های عامل خوردگی بیشتر بررسی می‌شود. خوردگی میکروبی یکی از مشکلات بزرگ در صنایع است که هزینه‌های هنگفت

در خصوص تعمیر و تعویض آنها به دنبال دارد. در زمینه خوردگی زیستی و میکروبیولوژیکی، به طور گسترده مطالعه و بررسی انجام شده است (۵).

در عمل سه دسته از میکروارگانیسم‌ها شامل جلبک‌ها، قارچ‌ها و باکتری‌ها در فرایندهای خوردگی میکروبی در صنایع مختلف نقش دارند. باکتری‌های اکسیدکننده آهن و باکتری‌های اکسیدکننده سولفات (SOB) از جمله باکتری‌های هوازی مؤثر در خوردگی میکروبی هستند. همچنین، جنس *Sodomonas* و سایر باکتری‌های مولد لایه‌های چسبنده لعابی در خوردگی هوازی نقش مهمی دارند.

از جمله مزیت‌های باکتری‌های آهن و باکتری‌های گوگردی این است که آنها قادر به رشد در pH پایین و تحمل غلظت بالای اسید هستند. این میکروارگانیسم‌ها به طور چشمگیری به بازه وسیعی از یون‌های معدنی مقاوم‌اند؛ اگرچه تفاوت‌های چشمگیری بین گونه‌ها وجود دارد. نیازمندی‌های غذایی نسبتاً کم این میکروارگانیسم‌ها با هوادهی سوسپانسیون معدنی حاوی آهن یا سولفور انجام می‌شود. افزودن مقادیر بسیار کم کودهای غیرآلی، منابع نیتروژن، فسفات، پتاسیم و عناصر جزئی را تأمین می‌کند. یکی از مزیت‌های عملیات‌های بیواکسیداسیون مواد معدنی این است که میکروارگانیسم‌های دخیل در آن به طور اتفاقی و ناخواسته آلوده نمی‌شوند. در فرایندهای لیچینگ، خارج کردن مواد معدنی به صورت پیوسته از طریق شست‌وشو صورت می‌گیرد که میکروارگانیسم‌های چسبیده را نیز می‌تواند جدا کند.

این دسته از باکتری‌ها روی محیط کشت حاوی آگار کم رشد می‌کنند که علت آن محصولات سمی ناشی از هیدرولیز آگار روی رشد این باکتری‌ها است؛

روش کارهای به کاررفته در این پژوهش‌ها

در این مطالعه مروری که در سال‌های اخیر انجام شده است، از تعدادی مقالات مربوط به تحقیقات انجام شده توسط نویسندگان مقاله و کار محققان دیگر در زمینه تجزیه زیستی تعدادی از آلاینده‌های شیمیایی در محیط زیست در پایگاه‌های اطلاعاتی مختلف استفاده شد. معیارهای ورود به مطالعه، شامل مرتبط بودن با هدف مطالعه، کیفیت مناسب مطالب ارائه شده در مقاله و در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز در مقاله بودند که به منظور انتخاب هر مقاله برای بررسی اعمال شدند.

نتایج

با توجه به آلاینده‌های مدنظر، نتایج به دست آمده از تجزیه زیستی آنها توسط باکتری‌های عامل خوردگی در اینجا مطالعه شده‌اند. یکی از آلاینده‌های شیمیایی محیط زیست، پنتاکلروفنل (PCP) است که تجزیه زیستی بی‌هوازی آن توسط باکتری‌های عامل خوردگی در ادامه آمده است.

تجزیه بی‌هوازی PCP

پنتاکلروفنل (PCP) به طور گسترده‌ای به عنوان یک آفت کش (مانند علف کش و حشره کش) و نگهدارنده چوب به دلیل فعالیت باکتری کشی استفاده می‌شود. قرار گرفتن طولانی مدت انسان و حیوانات در معرض سطوح پایین PCP می‌تواند باعث آسیب به کبد، کلیه‌ها، پلاسمای خون و سیستم عصبی شود. در محیط، PCP را می‌توان از طریق فرایندهای شیمیایی، میکروبیولوژیکی و فتوشیمیایی تجزیه کرد (۶، ۷). اغلب ترکیبات PCP در برابر حملات باکتریایی هوازی مقاومت نشان می‌دهند؛ اما می‌توان آنها را به صورت تقلیل دهنده به فنل‌هایی با

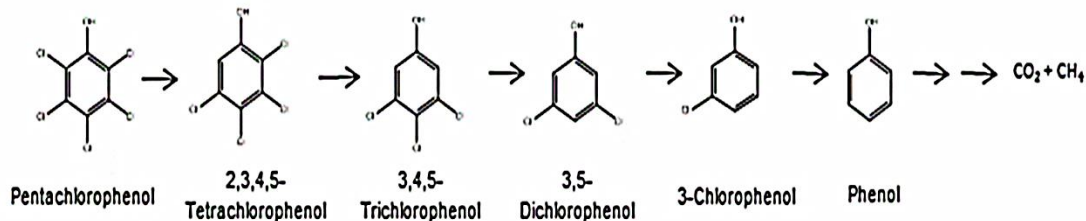
البته این مشکل با استفاده از آگارهای بسیار خالص یا استفاده از غلظت پایین آگار با pH برابر با ۲/۵-۲/۲ که فرسولفات با غلظت ۲۰ میلی‌مولار به آن اضافه شده است، می‌تواند برطرف شود. این باکتری‌ها اتوتروف هستند و قادر به استفاده از گلوکز به عنوان منبع کربن نیستند. چون این باکتری‌ها هوازی هستند، لازم است $\frac{2}{3}$ محیط کشت خالی باشد و در زمان گرماگذاری با تکان دادن محیط کشت، شرایط هوازی تأمین شود.

گزارش شده است باکتری‌های احیاکننده سولفات (SRB) مسئول خوردگی شدید ماشین‌آلات حفاری، پمپ‌ها و مخازن ذخیره‌سازی هستند. SRB‌ها شدیداً بی‌هوازی هستند و بنابراین در محیط‌های با پتانسیل احیای کم، مانند رسوبات مرداب‌ها یافت می‌شوند. دامنه ترکیبات دهنده الکترون گسترده است که توسط باکتری‌های احیاکننده سولفات استفاده می‌شود. H_2 ، لاکتات و پیرووات تقریباً به طور عمومی استفاده می‌شوند و بسیاری از گونه‌ها ترکیبات مالات، سولفونات و برخی از الکل‌های نوع اول مانند متانول، اتانول، پروپانول و بوتانول را به کار می‌برند. این گروه از باکتری‌ها، مجموعه‌ای متفاوت از نظر فیزیولوژی و مورفولوژی هستند.

با توجه به ویژگی‌های متابولسمی ویژه باکتری‌های عامل خوردگی، مانند باکتری‌های آهن و انواع باکتری‌های SRB، شناسایی توانمندی باکتری‌های عامل خوردگی در راستای تجزیه زیستی آلاینده‌های محیطی موضوع بسیار جالبی است که کمتر به آن توجه شده است؛ بنابراین، در این مقاله مروری، توانمندی مثبت باکتری‌های عامل خوردگی برای پاکسازی و تجزیه زیستی تعدادی از آلاینده‌های آلی محیط زیست بررسی شده است.

در سراسر غشا تولید می‌شود که تشکیل ATP را از طریق ATPase متصل به غشا هدایت می‌کند. این مکانیسم وابسته به غلظت می‌تواند با اصلاح بسترهای رشد آلی ساده تحریک شود. باکتری‌های با جنس‌های *Dehalobacter*، *Desulfitobacterium*، *Desulfomonile*، *Geobacter*، *Anaeromyxobacter*، *Sulfurospirillum*، *Desulfovibrio*، *Desulfuromonas*، *Dehalococcoides*، *Dehalobium*، *Dehalogenimonas* قادر به تجزیه بی‌هوازی PCP هستند. PCP به صورت بی‌هوازی از طریق یک سری واکنش‌های کاهش‌دهنده هالوژناسیون، تجزیه و منجر به تشکیل فنل می‌شود که می‌تواند بیشتر توسط پروکاریوت‌های بی‌هوازی به CH_4 و CO_2 تجزیه شود (شکل ۱). درک تخریب بی‌هوازی PCP و محرک‌های محیطی که بر تجزیه زیستی آن تأثیر می‌گذارند، برای بهبود فرایند کلی زیست‌پالایی ضروری است.

اتم‌های کلر کمتر هالوژنه کرد که ممکن است به راحتی تجزیه شوند. دکلره کاهشی یکی از مهم‌ترین فرایندهای تخریب برای حذف PCP در شرایط بی‌هوازی است. شرایط بی‌هوازی به نفع دکلره کاهشی است که به جابه‌جایی اتم‌های کلر توسط اتم‌های هیدروژن منجر می‌شود. هالوژن زدایی تقلیلی شامل استفاده از ترکیبات هالوژنه به عنوان گیرنده‌های الکترون پایانی برای انتقال الکترون‌های تنفسی بی‌هوازی با صرفه جویی در انرژی است. هالوژن زدایی کاهشی می‌تواند به صورت متابولیک، با تحریک باکتری‌ها با سیستم‌های آنزیمی نامشخص یا به صورت کاتابولیک رخ دهد که نیاز به ورودی بسترهای اهداکننده الکترون دارد. در طول هالوژن زدایی تقلیلی، الکترون‌ها از یک دهنده الکترون از طریق یک زنجیره انتقال الکترون به RDase موضعی غشایی منتقل می‌شوند و در نتیجه یک گرادیان پروتون



شکل ۱: هالوژن زدایی بی‌هوازی PCP

Figure 1: Anaerobic dehalogenation of PCP

همراه نانوذره نقره و تیتانیوم برای صنایع نساجی به کار می‌روند. این ترکیبات بعد از مصرف وارد محیط زیست می‌شوند. در پژوهش ماوندادنژاد و همکاران (۲۰۱۲) مشخص شد این الیاف روی باکتری‌های مفید خاک، مانند گونه‌های باسیلوس (برای تولید سلولاز) و ریزوبیوم که باکتری مفید خاک برای تثبیت ازت هستند، اثر سوء دارد و آنها را از بین می‌برد (۸). به همین دلیل، از میکروارگانیسم‌های تولیدکننده آنزیم‌های تجزیه‌کننده

ترکیبات نیتریل‌دار (سیانیدی)

نیتریل‌ها ترکیباتی با یک یا چند گروه فعال سیانید (CN) هستند که هم به صورت زیستی و هم شیمیایی تولید می‌شوند. این ترکیبات بسیار سمی و سرطان‌زا هستند و سبب جهش نیز می‌شوند. نیتریل‌ها از طریق پساب کارخانه‌ها وارد آب‌های جاری و آب‌های زیرزمینی می‌شوند و همچنین در ساخت الیاف آکریلیک به صورت آکریلونیتریل و گاهی اوقات به

اندرین^۳، لیندان^۴، کلردان^۵ و چندین نمونه دیگر هستند.

تجزیه زیستی (DDT)

دی کلرو دی فنیل تری کلرو اتان که معمولاً با نام DDT شناخته می‌شود، یک ترکیب شیمیایی کریستالی بی‌رنگ، بی‌مزه و تقریباً بدون بو و یک ارگانوکلر است. این ماده در اصل به‌عنوان حشره‌کش تولید می‌شد؛ اما به دلیل تأثیرات مخرب زیست‌محیطی بدنام شد (۱۲). برای تجزیه زیستی DDT حداقل CFU/gr 10^4 تجزیه‌کننده فعال نیاز است. گاهی مواد واسطه از تجزیه زیستی DDT سمی‌تر از خود این ماده هستند؛ مانند DDD، ۱،۱-دی کلرو-۲،۲-(۴-فنیل) اتان، DDE، ۱،۱-دی کلرو-۲،۲-(۴-کلروفنیل) اتیلن. متداول‌ترین واکنش‌های پیشنهادی طی تخریب DDT عبارت‌اند از دکلره‌زدایی، تقلیل‌دهنده، هیدروهالوژن‌زدایی، دی‌اکسیژناسیون، هیدروکسیلاسیون، هیدروژناسیون و برش متا حلقه (حمله بین ۲،۳ کربن به ساختار حلقه). اولین واسطه طی تخریب DDT از واکنش‌های ذکر شده، DDD در شرایط بی‌هوازی و تولید DDE در شرایط هوازی است. تعدادی از باکتری‌ها که حداقل در یک مرحله از تخریب DDT نقش دارند و جزء باکتری‌عامل خوردگی نیز هستند، عبارت‌اند از هوازی‌ها و بی‌هوازی اختیاری: *Alcaligenes denitrificans* ITRC-4، *Bacillus cereus*، *Shewanella decolorationis* S12، *marcescens* DT-1P، *Pseudomonas putida* *Methanogenic* و بی‌هوازی‌های مطلق: *Serratia*، *Clostridium*، granular sludge (۱۳).

تجزیه زیستی هوازی DDT توسط باکتری‌ها

در یک خاک آلوده تجزیه هوازی در ناحیه Vadose (سه فوت بالای خاک) رخ می‌دهد. در شکل

نیتریل می‌توان استفاده کرد؛ مانند آنزیم‌های نیتریلاز که توسط باکتری کلبسیلا، آلکالی ژنز فکالیس، سودوموناس فلورسنس و سودوموناس پوتیدا تولید می‌شوند. آنزیم آمیداز روی ترکیبات نیتریل اثر می‌گذارد و این ترکیبات را به اسید مربوطه و آمونیاک تبدیل می‌کند. این باکتری‌ها همچنین عامل خوردگی هستند؛ اما در این مطالعه به‌عنوان تجزیه‌کننده زیستی مواد نیتریل‌دار پیشنهاد می‌شوند (۹-۱۱).

انواع آفت‌کش‌ها

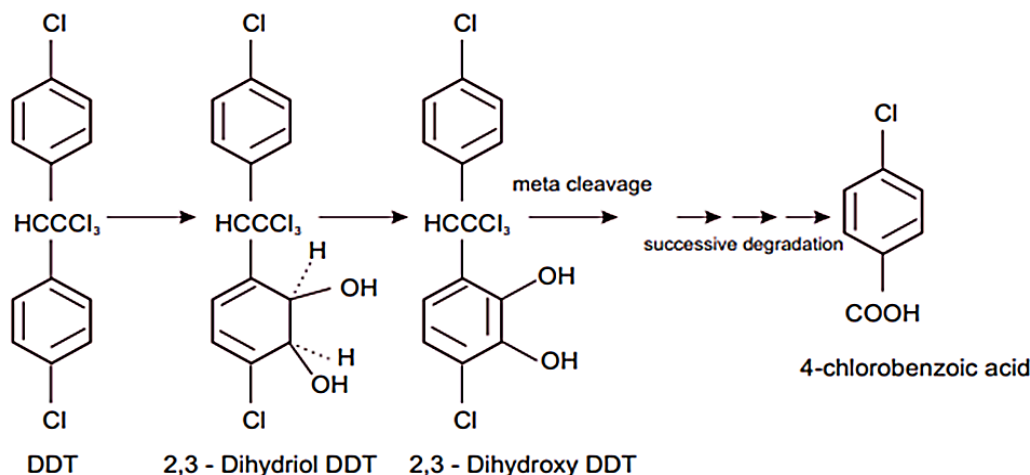
آفت‌کش‌ها با توجه به نوع عمل یا ترکیب شیمیایی و ساختار آنها طبقه‌بندی می‌شوند. این آفت‌کش‌ها براساس کاربرد، به چهار دسته تقسیم می‌شوند؛ حشره‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها، علف‌کش‌ها و سایر آفت‌کش‌های ویژه مانند کشنده جانوران جونده و کشنده نرم‌تنان. چهار طبقه‌بندی اصلی آفت‌کش‌ها بر طبق فرمول شیمیایی و ساختار آنان به این ترتیب است: ۱- هیدروکربن‌های کلرینه‌شده، ۲- کلروفنوکیسی اسیدها، ۳- فسفات‌های آلی، ۴- کربامیدها.

هیدروکربن‌های کلرینه‌شده

هیدروکربن‌های کلره به‌طور عمده از اسکلت کربن، هیدروژن و اتم کلر متصل به آن ساخته می‌شوند. این دسته از آفت‌کش‌ها به دو دلیل اساسی جزء متداول‌ترین در زمان حاضر در محیط هستند: ۱- استفاده کلی از آنها بیشتر از گروه‌های دیگر است؛ ۲- این ترکیبات در محیط خیلی مقاوم‌تر هستند (نسبت به دیگر گروه‌ها در مقابل تجزیه مقاوم‌ترند). مستعمل‌ترین آفت‌کش‌ها، DDT است که مربوط به گروه هیدروکربن‌های کلرینه است. از موارد دیگر در این گروه دی‌الدرین^۱، آلدین^۲،

برخی موارد تولید آنزیم‌های خاص می‌تواند متأثر از یک منبع کربن ثانویه باشد. سویه *Alcaligenes sp* در تخریب ۶۵ درصد DDT به شکل هوازای در خاک مؤثر است. میزان تخریب تا حد زیادی به حضور ۰/۵ درصد گلوکز نیز بستگی دارد. گلوکز تخریب DDT توسط *Serratia marraescens* DT-1P را مهار می‌کند؛ اما زمانی که در محیط مخلوطی از مخمر، پیتون و برات سویاتریپتیک وجود دارد تخریب به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد (۱۴، ۱۵).

(۲) متابولیسم DDT با حمله مستقیم به ساختار حلقه‌ای از طریق اکسیژن رسانی برای تشکیل ۳،۲-دی‌هیدرودیول DOT آغاز می‌شود. پس از تشکیل ۳،۲-دی‌هیدروکسی DDT و شکاف متا، بعد از مراحل متوالی ۴-کلروبنزوئیک اسید (4-CBA) ایجاد می‌شود. ترکیب دو مولکولی اکسیژن نیاز به حضور آنزیم‌های دی‌اکسیژناز دارد؛ بنابراین، باکتری‌هایی که می‌توانند با حمله به ساختار حلقه شروع به تخریب DOT کنند، فرض می‌شود دی‌اکسیژناز تولید می‌کنند. در



شکل ۲: مسیر تجزیه هوازی DDT توسط باکتری‌های تجزیه‌کننده

Figure 2: Aerobic degradation pathway of DDT by degrading bacteria

DDE می‌توانند در شرایط بی‌هوازی تشکیل شوند (با توجه به میکروبی استفاده‌شده)، DDE مطلوب نیست؛ زیرا می‌تواند در برابر مراحل تجزیه بعدی مقاوم‌تر باشد. یک مسیر بی‌هوازی DDD به عنوان متابولیت اولیه در شکل ۳ نشان داده شده است. این مسیر یکی از کامل‌ترین مسیرها است؛ زیرا هفت واسطه کلیدی را شناسایی می‌کند. DBP اغلب به عنوان «محصول نهایی» در شرایط بی‌هوازی در نظر گرفته می‌شود. مسیر برای *Sphingobacterium sp* نیز گزارش شده است که می‌تواند ۱۲/۹ درصد از DDT موجود در ۹۰ روز را

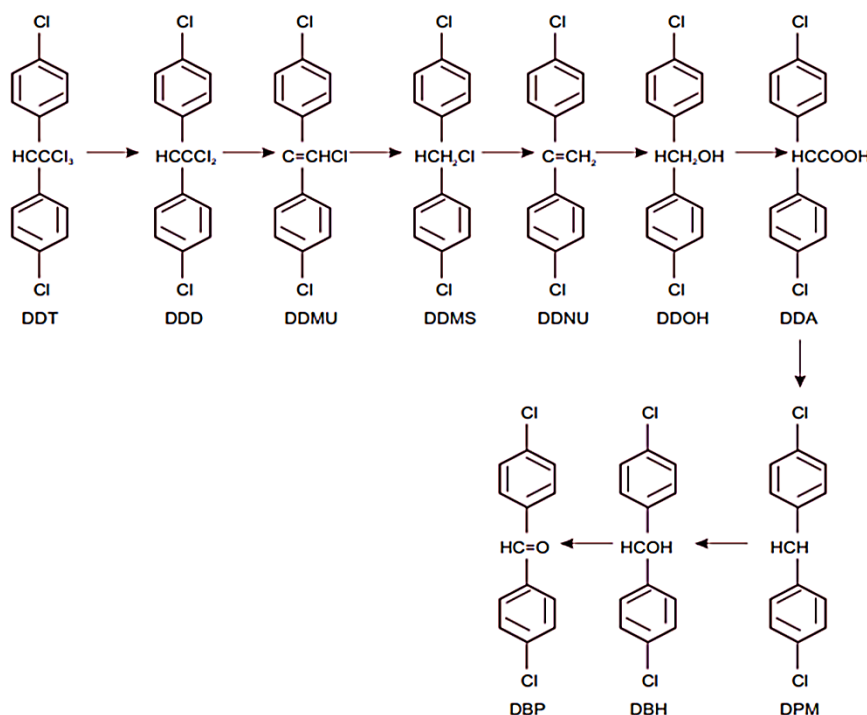
همان‌طور که در مطالعات نشان داده شده است، سویه‌های قارچی خاصی نیز می‌توانند DDT را در شرایط هوازی تجزیه کنند؛ اما در اینجا فقط باکتری‌ها بررسی می‌شوند.

تجزیه بی‌هوازی DDT توسط باکتری‌ها

تخریب سریع DDT معمولاً در شرایط بی‌هوازی از طریق کلرزدایی امکان‌پذیر است. این حالت حمله معمولاً به زنجیره آلکیل محدود می‌شود و ترکیبات DDD و DDE تولید می‌شوند. اگرچه هر دو DDD و

درمان مکان‌های آلوده به DDT باشد. تخریب DOT در هر دو شرایط هوازی و بی‌هوازی توسط ارگانسیم‌های مختلف نشان داده شده است. «محصول نهایی» اولیه گزارش شده برای بیشتر مسیرها کاروبنزویک اسید (4-CBA) و در شرایط بی‌هوازی دی‌کلروبنزوفنون (DBP) بوده است (۱۶). ممکن است تجزیه کامل برای DDT و متابولیت‌های آن امکان‌پذیر باشد؛ اما تا به امروز گزارش نشده است.

کاهش دهد. مطالعات اخیر تشکیل این متابولیت‌ها را برای رسوبات آلوده در شرایط بی‌هوازی از طریق کلرزدایی و کلرزنی احیایی زنجیره آلکیل نشان دادند. آنها همچنین دریافتند اگر DDE تشکیل شود، به دنبال تجزیه (2,2-bis(p-chorophenyl)ethane) -DDNU p,p chlorophenyl)ethylene می‌تواند به (1-P,p-DDMU chloro-2-2 - bis -(p-p chlorophenyl)ethylene تبدیل شود. این یافته‌های ذکر شده در بالا نشان می‌دهند پاکسازی زیستی می‌تواند روشی مناسب برای



شکل ۳: مسیر متابولیک DDT در شرایط بی‌هوازی

Figure 3: Metabolic pathway of DDT under anaerobic conditions

DBH (4,4-dichlorobenzhydrol)
DBP (4,4 -dichlorobenzophenone)

DDT ((1,1,1-trichloro-2,2-bis(4-chlorophenyl) ethane)
DDD (1,1-dichloro-2,2-bis(p-chlorophenyl) ethane)
DDMU (1-chloro-2,2-bis-(4 -chlorophenyl) ethylene)
DDMS (1-chloro-2,2-bis(4'-chlorophenyl) ethane)
DDNU (1,1-bis(4-chlorophenyl) ethylene)
DDOH (2,2-bis(4'-chlorophenyl) ethanol)
DDA (2,2-bis(p-chlorophenyl) acetate)

شوینده‌ها

شوینده‌ها یا دترجنت‌ها موادی هستند که برای از بین بردن لکه‌های چربی و چرک از سطوح مختلف به کار می‌روند که شامل موادی از قبیل صابون قلیایی،

تشکیل بیوفیلم قادر به تحمل کلرین و SDS است (۱۸). آلکیل سولفات‌ها آنزیم‌هایی هستند که اکثراً توسط باکتری‌های گرم منفی تولید می‌شوند و در تجزیه آلکیل سولفات‌ها اثر می‌گذارند؛ اما دو باکتری گرم مثبت باسیلوس سرئوس و کورینه فرم B1a قادرند این آنزیم را تولید کنند و تجزیه زیستی SDS را انجام دهند. به‌تازگی نشان داده شد که تشکیل بیوفیلم تجزیه مداوم SDS را حمایت می‌کند و باعث حذف آن می‌شود. با توجه به تحقیقات مربوط به جداسازی میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده شوینده‌ها، می‌توان از آنها برای تیمار پساب‌های شهری و کارخانه‌های تولیدکننده شوینده در کارگاه‌های ماشین‌شویی، استفاده و این ترکیبات زیان‌بار را قبل از وارد شدن به محیط زیست حذف کرد. باکتری‌های تجزیه‌کننده شوینده اکثراً از باکتری‌های گرم منفی شامل جنس‌های *Entrobacter*، *Proteus*، *Vibrio*، *Klebsiella*، *Flavobacterium*، *Acinetobacter*، *Pseudomonas* و *Escherichia* و باکتری گرم مثبت *Shigella* و *Bacillus cereus* بوده که از پساب جداسازی و شناسایی شده‌اند (۱۹، ۲۰).

مسیر متابولیسمی تجزیه سدیم دودسیل سولفات

متابولیسم SDS با باکتری‌های تجزیه‌کننده *Pseudomonas C13B* شوینده با استفاده از کربن نشان‌دار شده با مواد رادیواکتیو مشخص شد که طی این متابولیسم ۷۰ درصد از کربن نشان‌دار شده به صورت CO₂، رها و باقی‌مانده کربن نشان‌دار شده تقریباً در ساختار سلولی وارد می‌شوند. در این مسیر تحت‌تأثیر آنزیم آلکیل سولفاتاز، SO₃ و ۱- دودکانول آزاد می‌شوند که ۱- دودکانول تحت‌تأثیر آنزیم الکل دهیدروژناز به آلدهید دودکانال اکسید می‌شود. در

ترکیبات ظرفشویی قلیایی و تمیزکننده‌های محلول هستند؛ شوینده‌ها مولکول‌های آمفی‌پاتیک هستند؛ یعنی در ساختار خود هم گروه قطبی (آب‌دوست) و هم گروه غیرقطبی (آب‌گریز) دارند. شوینده‌ها قدرت انحلال در آب و پاک‌کنندگی دارند و نیز دارای سورفاکتانت به همراه ترکیبات مکمل، مانند سازنده‌ها، تقویت‌کننده‌ها، پرکننده‌ها و ترکیبات ضمیمه هستند.

سدیم دودسیل سولفات (SDS) یک ترکیب مهم سورفاکتانتی است و به میزان زیاد در شوینده‌هایی مانند شامپوها، صابون‌های ماشین‌شویی و خمیردندان‌ها، استفاده و به‌سرعت در شرایط هوای تجزیه می‌شود که در تجزیه اولیه و نهایی این سورفاکتانت میکروارگانیسم‌ها مهم هستند. SDS از دو بخش تشکیل شده است؛ یک زنجیره هیدروکربنی (C12) و یک گروه سولفات متصل به زنجیره.

با توجه به افزایش استفاده از SDS پاکسازی زیستی آن توسط میکروارگانیسم‌های مناسب حائز اهمیت است. در سال ۲۰۱۳ شهبازی و همکاران باکتری‌های تجزیه‌کننده را از پساب کارگاه‌های ماشین‌شویی جداسازی کردند (۱۷). شرایط بهینه برای افزایش تجزیه SDS مانند pH، دما و دور شیکر بررسی شد. یکی از باکتری‌های جداسازی‌شده سودوموناس آئروژینوزا (*P. aeruginosa*) بود. شرایط بهینه برای تجزیه زیستی SDS توسط این باکتری به‌صورت میزان تلقیح باکتری ۷ درصد، pH برابر ۷/۵ و دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد همراه با افزودن نیترات آمونیم به‌عنوان منبع ازت و گلوکز به‌عنوان ماده کمکی کربن به محیط کشت پایه تعیین شد. میزان SDS برابر با ۱/۵ میلی‌مول بود که در ۲۴ ساعت در شرایط بهینه مزبور ۹۸ درصد آن تجزیه شد. در پژوهش دیگری مشخص شد که این باکتری با

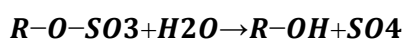
متابولیت‌های آب‌گریز زنجیره آلکیل سدیم دودسیل سولفات می‌توانند وارد ترکیبات سلولی شوند؛ بدون اینکه توسط بتا‌اکسیداسیون تجزیه شوند (۲۱).

در شکل ۴ مسیر تجزیه آلکیل سولفات‌ها نشان داده شده است. آلکیل سولفات‌ها که اغلب با عنوان الکل سولفات‌ها خوانده می‌شوند، از طریق سنتز آلکیل‌های خطی استرهای اسید سولفوریک تشکیل می‌شوند. لوریل آلکیل سولفات یا سدیم دودسیل سولفات SDS یک ترکیب مهم سورفاکتانت است.

مرحله بعد، دودکانال توسط آلدهید دهیدروژناز به اسید چرب (لوریک اسید) تبدیل می‌شود، این اسید چرب توسط آنزیم استیل-کوآ سنتتاز به لوریل-کوآ، تبدیل و در ادامه این ترکیب توسط فرایندهای بتا‌اکسیداسیون، وارد چرخه کربس و به CO₂ و H₂O تبدیل می‌شود؛ البته در حدود ۷۰ درصد الکل وارد شده در این مسیر، تجزیه و ۳۰ درصد باقی‌مانده طی فرایند طویل‌سازی به اسیدهای چرب با طول C14، C16 و C18 تبدیل می‌شوند و در تشکیل لیپیدهای سلولی همانند فسفولیپیدها شرکت می‌کنند؛ به این ترتیب،

الکیل سولفات ← الکل

الکل ← اسید ← استیل کوآ ← چرخه ی کربس



شکل ۴: مسیر تجزیه کلی آلکیل سولفات‌ها

Figure 4: General decomposition pathway of alkyl sulfates

می‌کند. سوزاندن پلاستیک‌ها یک راه مبارزه با تجزیه‌ناپذیری آنهاست؛ اما این روش گران و خطرناک است؛ ضمن اینکه مواد شیمیایی مضر از قبیل اسید هیدروکلریک و نیز سیانید هیدروژن در طول سوختن پلاستیک‌ها آزاد می‌شوند. زباله کردن پلاستیک‌ها یک راه دیگر است؛ اما این روش نیز اشکالاتی دارد: اول اینکه تقسیم‌بندی زباله‌های پلاستیکی به دلیل طیف وسیع آنها مشکل است؛ دوم، محدوده کاربردی زباله‌های پلاستیکی بسیار اندک است (۲۲).

در سال‌های اخیر، تلاش‌های قانونی برای جلوگیری از دورریزی پلاستیک‌های تجزیه‌ناپذیر افزایش یافته‌اند. این تلاش‌ها فعالان صنعت پلاستیک را واداشته است تا به دنبال پلاستیک‌هایی باشند که مشکلات زیست‌محیطی کمتری دارند؛ مانند پلاستیک‌هایی که با نور تجزیه

یکی دیگر از آلاینده‌های محیط زیست، پلاستیک‌ها هستند که در محیط زیست انباشته می‌شوند و تجزیه آنها هزاران سال طول می‌کشد. یکی از راه‌حل‌ها، تولید پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر (PHA) توسط باکتری‌های عامل خوردگی است. راه‌حل دیگر، استفاده از این باکتری‌ها در تجزیه زیستی پلاستیک‌های موجود و رها شده در محیط زیست و بازیافت آنها است.

پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر، پلی‌هیدروکسی آلکانوات‌ها (PHA)

دلیل اصلی تخریب‌پذیر نبودن پلاستیک‌ها، وجود مواد با وزن مولکولی بالا، طویل بودن طول مولکول پلیمر و پیوند قوی بین منوهرهای آنها است که تجزیه آن را توسط موجودات تجزیه‌کننده با مشکل مواجه

باکتری‌ها در داخل سلول سنتز می‌شود و درون سلول تجمع می‌یابد. باکتری در زمان گرسنگی از PHB به‌عنوان منبع کربن و انرژی استفاده می‌کند. PHB یک نقش مهم در بقای میکروارگانیسم در شرایط سخت نظیر کمبود مواد غذایی محیط، فشار اسموتیک و تابش اشعه فرابنفش دارد. استخراج بالای PHB در طیف انبوهی از میکروارگانیسم‌ها شامل گونه‌هایی از *Alcaligenes*، *Pseudomonas*، *Syntrophomonas* genera و *Clostridium* نشان داده شده است؛ البته تمام میکروارگانیسم‌ها واجد PHB نیستند؛ برای مثال، درصد اندکی از آنتروباکتری‌ها و برخی گونه‌های سیانوباکتری‌ها PHB تولید می‌کنند (۲۴).

باکتری‌ها می‌توانند PHB را به‌طور کامل به آب و دی‌اکسید کربن تجزیه کنند. در حقیقت، تخریب پذیری طبیعی پلاستیک‌ها، با منشأ PHA باعث استفاده آنها در صنعت پزشکی شده است. کاربرد این پلاستیک‌ها در پزشکی اینگونه است که پلیت‌های ساخته شده از PHA در بدن انسان می‌توانند در بهبود شکستگی استخوان مؤثر باشند. نکته جالب این است که پس از بهبود استخوان، پلاستیک‌ها به آرامی در بدن انسان تجزیه می‌شوند (۲۵). تعدادی از باکتری‌های عامل خوردگی، مانند سودوموناس پوتیدا و باسیلوس سرئوس قادر به تجزیه زیستی پلاستیک‌ها و برخی از این نوع باکتری‌ها قادر به بازیافت پلاستیک هستند (۲۶-۲۸). در جدول ۱، خلاصه‌ای از یافته‌های مربوط به تجزیه زیستی برخی از آلاینده‌ها توسط تعدادی از باکتری‌های عامل خوردگی ارائه شده است.

می‌شوند، پلاستیک‌هایی که در ساختمان خود نشاسته دارند و پلاستیک‌های میکروبی.

ساختمان پلاستیک‌هایی که توسط نور تجزیه می‌شوند، بر اثر پرتوهای فرابنفش (پس از چند هفته یا ماه) از هم می‌پاشد و مستعد تجزیه میکروبی می‌شود. عیب این نوع پلاستیک‌ها این است که بسیاری از مکان‌های دفن زباله نور کافی ندارند؛ از این رو، ساختمان این پلاستیک‌ها دست‌نخورده باقی می‌ماند و برای تجزیه میکروبی آماده نمی‌شود. در پلاستیک‌های نشاسته‌ای مولکول‌های نشاسته قطعات کوتاهی از پلی‌اتیلن را به هم متصل می‌کنند. وقتی این پلاستیک‌ها در مکان‌های دفن زباله landfill دور ریخته می‌شوند، باکتری‌های خاک به مولکول‌های نشاسته، حمله و قطعات پلی‌اتیلن را برای تجزیه میکروبی رها می‌کنند. کمبود اکسیژن در مکان‌های دفن زباله و اثر مهاری قطعات پلی‌اتیلن بر عملکرد باکتری‌ها، از جمله معایبی است که استفاده از این پلاستیک‌ها را محدود می‌کند. دسته سوم، پلاستیک‌های تجزیه پذیر جدید و خیلی مفید هستند؛ زیرا عمل آنها در به‌کارگیری باکتری‌ها به‌عنوان یک بیوپلیمر است. در سال ۱۹۲۵، Bacterial plastic، پلاستیک‌های زیستی در انستیتو پاستور کشف شد که در آنجا پلیمری به نام Poly- β -hydroxyalkanoate به مقدار زیاد توسط باکتری‌ها سنتز می‌شد (۲۳).

شناخته‌شده‌ترین پلی‌هیدروکسی آلکانوات، پلی‌بتا هیدروکسی بوتیرات (PHB) است که هومو پلیمری از ۳-هیدروکسی بوتیرات است. PHB شامل هزاران مولکول هیدروکسی بوتیرات است که از انتها به یکدیگر متصل شده‌اند. PHB توسط تعدادی از

جدول ۱: چکیده یافته‌های مربوط به تجزیه زیستی برخی آلاینده‌ها توسط تعدادی از باکتری‌های عامل خوردگی

Table 1: Summary of the findings related to the biodegradation of some pollutants by a number of corrosive bacteria

مثال از باکتری‌های تجزیه کننده	شرایط تجزیه	دسته بندی آلاینده	آلاینده زیستی
<i>Desulfitobacterium</i> <i>Dehalobacter</i> <i>Desulfuromonas</i> <i>Desulfovibrio</i>	هالوژن زدایی کاهشی در شرایط بی‌هوازی	آفت کش	پنتاکلروفنل (PCP)
<i>Pseudomonas putida</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>Klebsiella</i> <i>Alcaligenes fecalis</i>	آنزیم‌های تجزیه کننده نیتریل (نیتریلاز)	حضور در پساب‌های نساجی	ترکیبات نیتریل دار (سیانیدی)
<i>Sphingobacterium sp</i>	هالوژن زدایی کاهشی در شرایط بی‌هوازی	حشره کش	دی کلرو دی فنیل تری کلرو اتان (DDT)
<i>Alcaligenes sp</i> <i>Pseudomonas putida</i> <i>Bacillus cereus</i> <i>Serratia marraescens</i> DT-1P	دی اکسیژناسیون، هیدروکسیلاسیون، هیدروژناسیون و برش متا حلقه در شرایط هوازی		
<i>Pseudomonas sp</i> <i>Bacillus cereus</i>	تجزیه آلکیل سولفات‌ها توسط آلکیل سولفاتاز	شوینده	سدیم دودسیل سولفات (SDS)
<i>Pseudomonas putida</i> <i>Bacillus cereus</i>	استفاده از PHB به عنوان منبع کربن توسط باکتری	بیوپلاستیک	پلی هیدروکسی بوتیرات (PHB)

بحث و نتیجه گیری:

شرایط، مکان و نوع باکتری مدنظر مناسب باشد و تأثیر مضر بر موجودات زنده و میکروارگانیسم‌های مفید نداشته باشد. برای این هدف باید مواد حد واسطه حاصل از مسیر تجزیه زیستی آلاینده‌ها شناسایی و عدم سوء اثر آنها مشخص شود.

۴- هزینه تولید انبوه و صنعتی این باکتری‌ها پذیرفتنی و مناسب باشد.

۱- آلاینده‌های محیط زیست، مانند ترکیبات شیمیایی (PCP)، آکریلونیتریل‌ها، آفت کش‌ها، شوینده‌ها و پلاستیک در این مقاله به عنوان عوامل خطرناک در محیط زیست مطالعه شده‌اند.

۲- در این مطالعه مشخص شد تعدادی از باکتری‌های عامل خوردگی قدرت تجزیه زیستی آلاینده‌های مزبور را دارند.

۳- برای به کارگیری این باکتری‌ها لازم است

References

- (1). Fahmideh L., Khodadadi E., khodadadi E. A review of applications of biotechnology in the environment. *International Journal of Farming and Allied Sciences*. 2014; 3(12): 1319-1325. <https://ijfas.com/wp-content/uploads/2015/01/1319-1325.pdf>
- (2). Megharaj M., Ramakrishnan B.,

- Venkateswarlu K., Sethunathan N., Naidu R. Bioremediation approaches for organic pollutants: a critical perspective. *Environment International*, 2011; 37: 1362–1375. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.06.003>
- (3). Bosso L., Cristinzio G. A comprehensive overview of bacteria and fungi used for

- pentachlorophenol biodegradation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2014; 13: 387–427. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9342-6>
- (4). Bhatt P., Gangola S., Bhandari G., Zhang W., Maithani D., Mishra S., et al. (2020). New insights into the degradation of synthetic pollutants in contaminated environments. *Chemosphere*, 2020; 268: 128827. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128827>
- (5). Khani M., Bahrami A., Momeni V. Microbial corrosion and methods to prevent and control it using coatings and biological factors. *Journal of Studies in Color World*, 2015; 4(4): 3-20. https://jscw.icrc.ac.ir/article_76372.html [In Persian].
- (6). Kamashwaran SR., Crawford DL. Anaerobic biodegradation of pentachlorophenol in mixtures containing cadmium by two physiologically distinct microbial enrichment cultures. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2001; 27: 11–17. <https://doi.org/10.1038/sj.jim.7000153>
- (7). Shi X., He C., Lu J., Guo H., Zhang B. Concurrent anaerobic chromate bioreduction and pentachlorophenol biodegradation in a synthetic aquifer. *Water Research*, 2022; 216: 118326. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118326>
- (8). Mavendadenjad F., Kasra Kermanshahi R. (2012). Antimicrobial effect of acrylic fibers containing nanoparticles (silver and titanium) on some beneficial soil bacteria. *Applied Biology*, 2012; 26(2): 76-84. <https://doi.org/10.3390/mi10120829> [In Persian].
- (9). Banerjee A., Sharma R., Banerjee UC. The nitrile-degrading enzymes: current status and future prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2002; 60(1-2): 33-44. <https://doi.org/10.1007/s00253-002-1062-0>
- (10). Brady D., Beeton A., Zeevaart J., Kgaje C., van Rantwijk F., Sheldon RA. Characterisation of nitrilase and nitrile hydratase biocatalytic systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004; 64(1): 76-85. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1495-0>
- (11). Kohyama E., Dohi M., Yoshimura A., Yoshida T., Nagasawa T. Remaining acetamide in acetonitrile degradation using nitrile hydratase- and amidase-producing microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007; 74(4): 829-35. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0738-2>
- (12). Sudharshan S., Naidu R., Mallavarapu M., Bolan N. DDT remediation in contaminated soils: a review of recent studies. *Biodegradation*, 2012; 23: 851–63. <https://doi.org/10.1007/s10532-012-9575-4>
- (13). Fang H., Cai L., Yang Y., Ju F., Li X., Yu Y., et al. Metagenomic analysis reveals potential biodegradation pathways of persistent pesticides in freshwater and marine sediments. *Science of the Total Environment*, 2014; 470: 983-992. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.076>
- (14). Kamanavalli CM., Ninnekar HZ. Biodegradation of DDT by a *Pseudomonas* species. *Current Microbiology*, 2004; 48: 10–3. <https://doi.org/10.1007/s00284-003-4053-1>
- (15). Cheng M., Chen D., Parales R.E., Jiang J. Oxygenases as Powerful Weapons in the Microbial Degradation of Pesticides. *Annual Review of Microbiology*, 2022; 76: 91758. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-041320-091758>.
- (16). Fang H., Dong B., Yan H., Tang FF., Yu YL. Characterization of a bacterial strain capable of degrading DDT congeners and its use in bioremediation of contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 2010; 184: 281–9. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.034>
- (17). Shahbazi R., Kasra-Kermanshahi R., Gharavi S., Moosavi-Nejad Z., Borzooee F. Screening of SDS-degrading bacteria from car wash wastewater and study of the alkylsulfatase enzyme activity. *Iranian Journal of Microbiology*, 2013; 5: 153–158. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23825734/>
- (18). Shahbazi R., Kasra-Kermanshahi R., Gharavi S., Moosavi-Nejad Z., Borzooee F. Optimal conditions for enhancing sodium dodecyl sulfate biodegradation by *Pseudomonas aeruginosa* KGS. *Progress in*

- Biological Sciences*, 2013; 3(2): 107-15.
<https://doi.org/10.22059/PBS.2013.35840>
- (19). Shiri Z., Kermanshahi RK., Soudi MR., Farajzadeh D. Isolation and characterization of an n-hexadecane degrading *Acinetobacter baumannii* KSS1060 from a petrochemical wastewater treatment plant. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015; 12: 455-464.
<https://doi.org/10.1007/s13762-014-0702-0>
- (20). Biswas R., Joshi S., Jindal T., Prasad R. A Novel Study on Anionic Surfactant Degradation Potential of Psychrophilic and Psychrotolerant *Pseudomonas* spp. Identified from Surfactant-contaminated River Water. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2023.
<https://doi.org/10.1007/s12010-023-04647-y>
- (21). Thomas OR., White GF. Metabolic pathway for the biodegradation of sodium dodecyl sulfate by *Pseudomonas* sp. C12B. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 1989; 11(3): 318-27.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2503014/>
- (22). Tan GY., Chen LC., Ge L., Wang L., Mutiara I., Razaad N, et al. Start a Research on Biopolymer Polyhydroxyalkanoate (PHA): A Review. *Polymers*, 2014; 6(3): 706-754.
<https://doi.org/10.3390/polym6030706>
- (23). Urtuvia V., Villegas P., González M., Seeger M. Bacterial production of the biodegradable plastics polyhydroxyalkanoates. *International Journal of biological macromolecules*, 2014; 70: 208-213.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.06.001>
- (24). Anderson AJ, Dawes EA. (1990). Occurrence, Metabolism, Metabolic Role, and Industrial Uses of Bacterial Polyhydroxyalkanoates. *Microbiological Reviews*, 1990; 54: 450–472. <https://doi.org/10.1128/mr.54.4.450-472.1990>
- (25). Muller-Santos M., Koskimaki J., Silveira Alves LP., Maltempi de Souza E., Jendrosseck D., Pirttila AM. The protective role of PHB and its degradation products against stress situations in bacteria. *FEMS Microbiology Reviews*, 2021; 45: 1–13.
<https://doi.org/10.1093/femsre/fuaa058>
- (26). Venkatesh S., Mahboob S., Govindarajan M., Al-Ghanim K., Ahmed Z., Al-Mulhm N., et al. Microbial degradation of plastics: Sustainable approach to tackling environmental threats facing big cities of the future. *Journal of King Saud University - Science*, 2021; 33(3): 101362.
<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101362>
- (27). Hai T., Lange D., Rabus R., Steinbüchel A. Polyhydroxyalkanoate (PHA) accumulation in sulfate-reducing bacteria and identification of a class III PHA synthase (PhaEC) in *Desulfococcus multivorans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004; 70(8): 4440-8.
<https://doi.org/10.1128/AEM.70.8.4440-4448.2004>
- (28). Ali SS., Elsamahy T., Al-Tohamy R., Zhu D., Mahmoud Y., Koutra E., et al. Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects. *Science of the Total Environment*, 2021; 780: 146590.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590>

¹ Dieldrin² Aldrin³ Endrin⁴ Lindane⁵ Chlordane