



## Evaluation of the commercial biocides effects in antifouling paints on marine organisms

Soolmaz Soleimani  

Corresponding Author, Post Doc, Department of Resins and Additives, Faculty of Surface Coating and Novel Technologies, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: [Soleimanisoolmaz@gmail.com](mailto:Soleimanisoolmaz@gmail.com)

### Article Info

#### Article type

Research Article

#### Article history

Received: 7 April 2024

Revised: 13 April 2024

Accepted: 14 April 2024

Published: 17 March 2024

#### Keywords:

Antifouling paint

booster biocides

Copper-based compounds

Marine organisms

### Abstract

**Objective:** In the marine environment, biofouling phenomenon is referred to as the undesired colonization of marine organisms on anthropogenic surfaces that are immersed into the seawater. To deter the unwanted biofouling, it is common to coat the immersed surfaces with a layer of antifouling paint, which will release antifouling biocide in a controlled manner to form a protective film against nearby biofoulers. The purpose of this study is to review the studies done in this field, especially in the direction of sustainable environmental protection and marine organisms.

**Methods:** The research method included searching for articles in Google Scholar using antifouling, biocides and related keywords.

**Results:** The results showed that all biocides used in commercial antifouling paints detrimental the environment and non-target marine organisms.

**Conclusion:** In general, by knowing the fate and pollution caused by biocides in the marine environment, appropriate measures can be taken to protect marine natural resources. It is hoped that in the near future, foul-release coatings will replace today's coatings and paints as biocide-free and environmentally safe coatings.

**Cite this article:** Soleimani, S. (2024). Evaluation of the commercial biocides effects in antifouling paints on marine organisms. *Ethnobiology and Conservation*, 1(2), 51-60.  
<https://doi.org/10.22091/ethc.2024.10591.1023>



©The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22091/ETHC.2024.10591.1023>

Publisher: University of Qom



## بررسی اثرات زیست‌کش‌های تجاری در رنگ‌های ضدجرم بر ارگانسیم‌های دریایی

سولماز سلیمانی ✉

نویسنده مسئول، پسادکتری، گروه رزین و افزودنی‌ها، پژوهشکده پوشش‌های سطح و فناوری‌های نوین، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران. رایانامه:

[soleimanisoolmaz@gmail.com](mailto:soleimanisoolmaz@gmail.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>نوع مقاله</b> پژوهشی	<b>هدف:</b> در محیط دریایی، پدیده جرم‌زیستی به عنوان تجمع نامطلوب ارگانسیم دریایی در سطوح ساخته شده توسط انسان که در آب دریا غوطه‌ور می‌شوند، نامیده می‌شود. برای جلوگیری از جرم‌زیستی ناخواسته، پوشاندن سطوح غوطه‌ور شده با لایه‌ای از رنگ ضدجرم معمول است، که باعث آزاد شدن زیست‌کش ضدجرم به شیوه‌ای کنترل‌شده برای تشکیل یک لایه محافظ در برابر جرم‌های زیستی می‌شود. هدف این مطالعه مروری بر مطالعات انجام یافته در این زمینه به‌ویژه در راستای حفاظت از محیط زیست و ارگانسیم‌های دریایی است.
<b>تاریخچه</b> دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۶ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷	<b>مواد و روش‌ها:</b> روش تحقیق شامل جستجوی مقالات در گوگل اسکولار با استفاده از کلیدواژه‌های ضدجرم، زیست‌کش و مرتبط با آن بود.
<b>کلیدواژه‌ها</b> ارگانسیم‌های دریایی ترکیبات مس رنگ ضدجرم زیست‌کش	<b>نتایج:</b> نتایج نشان داد که تمام زیست‌کش‌های استفاده شده در رنگ‌های ضدجرم تجاری به محیط زیست و ارگانسیم‌های دریایی غیرهدف آسیب می‌زنند.
	<b>نتیجه‌گیری:</b> به طور کلی با آگاهی از سرنوشت و آلودگی‌های ایجاد شده توسط زیست‌کش‌ها در محیط دریا می‌توان اقداماتی مناسب در جهت حفاظت از منابع طبیعی دریایی انجام داد. امید است که در آینده نزدیک پوشش‌های جرم‌رهش به عنوان پوشش‌های بدون زیست‌کش و ایمن برای محیط زیست جایگزین پوشش و رنگ‌های امروزی شود.

**استناد:** سلیمانی، سولماز (۱۴۰۲). بررسی اثرات زیست‌کش‌های تجاری در رنگ‌های ضدجرم بر ارگانسیم‌های دریایی. قوم‌زیست‌شناسی و حفاظت، ۱(۲)،

۵۱-۶۰. <https://doi.org/10.22091/ethc.2024.10591.1023>



## مقدمه

زیست‌جرم<sup>۱</sup> به عنوان تجمع نامطلوب و رشد گیاهان و ارگانسیم‌های جانوری بر روی ساختارهای غوطه‌ور در آب دریا تعریف می‌شود (Callow and Callow, 2011). جرم دریایی<sup>۲</sup> احتمالاً شناخته شده‌ترین شکل جرم زیستی است، زیرا یک مشکل مهم جهانی است که اثرات زیانباری بر ابزار ساخته شده توسط انسان در آب دریا دارد. این مشکلات شامل افزایش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش سرعت و کیفیت محصول، خوردگی سازه‌های دریایی و مشکلات زیست محیطی است (Pistone et al., 2021).

مشکل زیست‌جرم در صنعت دریایی از جمله کشتیرانی و آبی‌پروری بر تمام بخش‌های غوطه‌ور در آب‌های دریایی تأثیر می‌گذارد، از جمله بخش‌های غوطه‌ور، بدنه کشتی‌ها، انتقال‌دهنده حرارت و خنک‌کننده‌ها، تور و طناب‌ها هستند که راندمان کار را کاهش می‌دهد، باعث مقاومت اصطکاکی بالاتر، کاهش سرعت و مانورپذیری می‌شود (Duan et al., 2022; Eslami et al., 2019; Yang et al., 2014). به عنوان مثال، افزایش درگ اصطکاکی باعث کاهش سرعت شناورها بیش از ۱۰ درصد می‌شود. تخمین زده شد که کشتی که به آن موجودات زیست‌جرم چسبیده‌اند ۴۰ درصد سوخت بیشتری می‌سوزاند و منجر به هزینه‌های عمده می‌شود که تقریباً بین ۱۸۰ تا ۲۶۰ میلیون دلار در سال برای ناوگان نیروی دریایی ایالات متحده است (Ara et al., 2020). تأثیر زیست‌جرم را می‌توان در سازه‌های دریایی، صفحه نمایش‌ها، مبدل‌های حرارتی، سیستم‌های لوله‌کشی که باعث کاهش کلی نیروگاه‌ها می‌شود، مشاهده نمود (Martins and Martins, 2021). تجمع زیست‌جرم یک فرآیند همیشه حاضر در زیستگاه‌های آبی است (ACTION, 2020) که تنوع و تراکم آن به عوامل مختلفی از جمله موقعیت جغرافیایی، فصل، عمق غوطه‌وری، جهت‌گیری بستر، در دسترس بودن نور، و میزان ضایعات آلی و معدنی تولید شده توسط موجودات دیگر (به عنوان مواد مغذی) بستگی دارد (De Nys and Guenther, 2009; Fitridge et al., 2012). هزینه کامل اقتصادی زیست‌جرم در صنایع دریایی به‌طور دقیق مشخص نیست، زیرا بسیاری از اثرات ثانویه هنوز تا حد زیادی ناشناخته هستند (Bannister et al., 2019; Singh et al., 2023). برای حل این مشکل، صنایع دریایی نیاز به توسعه فناوری‌های مدیریت زیست‌جرم دارد.

اگرچه رویکرد علمی برای درک و مدیریت جرم زیستی نسبتاً جدید است، دریانوردان باستانی به خوبی از مسائل ناشی از زیست‌جرم آگاه بودند. توسعه فناوری ضدجرم<sup>۳</sup> ریشه در حمل و نقل و نیاز به محافظت از بدنه کشتی در برابر آسیب موجودات جرم دارد. در عصر کشتی‌هایی با بدنه چوبی، نرم‌تن‌های حفرکننده چوب یک مشکل جدی بودند، زیرا یک کشتی محافظت نشده ممکن است به مقصد برسد و درصد قابل توجهی از بدنه خود را از دست بدهد. تصور می‌شود که فینیقی‌ها و کارتاژنی‌ها از پوشش‌های ساخته شده از قیر استفاده می‌کردند. یونانیان باستان از قیر، موم و غلاف سرب استفاده می‌کردند. نوشته‌های پلوتارک (۴۵-۱۲۵ پس از میلاد) به نیاز به خراشیدن علف‌های هرز، لجن و آلودگی از قسمت زیرین کشتی‌ها اشاره می‌کند تا راحت‌تر در آب حرکت کنند. از قرن سیزدهم تا پانزدهم، کشتی‌ها اغلب با قیر پوشیده می‌شدند، و پوشش مسی در اوایل قرن شانزدهم روی بدنه کشتی‌ها استفاده می‌شد. در اواخر قرن هفدهم، پوشش مسی به عنوان موثرترین ضدجرم موجود در آن زمان شناخته شد و در سال ۱۸۲۴ اولین تحقیق در مورد سازوکار شیمیایی ویژگی‌های ضدجرم پوشش مسی منتشر شد (Yebra et al., 2006).

در اواخر قرن هجدهم، کشتی‌هایی با بدنه آهنی و موتورهای بخار جایگزین کشتی‌های چوبی شد و توجهات زیادی برای جلوگیری از زیست‌جرم به خود جلب کرد، زیرا درگ باعث کاهش شدید سرعت کشتی و افزایش مصرف سوخت آن می‌شد. با این حال، استفاده از پوشش مسی به دلیل اثرات خوردگی الکترولیتی خطرناک آن بر روی بدنه‌های آهنی متوقف شد (Sankar et al., 2015). در نتیجه، تلاش بیشتری برای توسعه پوشش‌ها و رنگ‌هایی انجام شد که حاوی ماده زیست‌کش تری‌بوتیل‌تین در ساختار پلیمری آن‌ها بود. این پوشش‌های ضدجرم حاوی زیست‌کش با ایجاد یک لایه مرزی سمی در سطح پوشش به هنگام آزادسازی زیست‌کش کار می‌کنند. این لایه مرزی یا لاروها و هاگ‌ها را از نشست بر روی سطوح باز می‌دارد یا به طور کامل آن‌ها را می‌کشد (Yilgör and Yilgör, 2014). پوشش‌های پلیمری ضدجرم حاوی ماده زیست‌کش تری‌بوتیل‌تین بر

<sup>1</sup>. Biofouling

<sup>2</sup>. Marine fouling

<sup>3</sup>. Antifouling

صنعت پوشش پلیمری حاکم شدند تا اینکه سازمان بین‌المللی محیط زیست دریایی، استفاده از ترکیبات ارگانوتین در سال ۲۰۰۳ را به علت اثرات منفی محیطی ناشی از آزاد شدن مواد زیست‌کش موجود در آن‌ها، ممنوع کرد (IMO, 2001). ممنوعیت ترکیبات حاوی تری‌بوتیل‌تین باعث شد تا شرکت‌های تولیدکننده پوش‌رنگ سامانه‌های ضدجرم بدون قلع را جایگزین کنند. این پوشش‌ها با استفاده از زیست‌کش‌های آلی در کنار ترکیباتی بر پایه‌ی مس، به عنوان جایگزینی برای ترکیبات حاوی تری‌بوتیل‌تین معرفی شدند (Kiil et al., 2001). انواع زیست‌کش‌هایی که تاکنون برای اهداف ضدجرم استفاده شده‌اند متنوع هستند. به عنوان جایگزین‌های فوری، صنعت ضدجرم از زیست‌کش‌های تقویت‌کننده ضدجرم متعددی (مانند دیورون، ایرگارول ۱۰۵۱، پیریتیون روی، پیریتیون مس، کلروتالونیل و SeaNine 211) استفاده می‌کند که قبلاً به عنوان قارچ‌کش یا علف‌کش در رنگ‌ها استفاده می‌شد (Qian et al., 2013; Readman, 2006; Yebra et al., 2004). با این حال، از آنجایی که ارزیابی سیستماتیکی از خطرات زیست‌محیطی این زیست‌کش‌های تقویت‌کننده وجود ندارد، کاربرد وسیع آن‌ها تهدیدات جدیدی را برای اکوسیستم‌های دریایی از جمله آلودگی محیط ساحلی و سمیت بالا برای ارگانسیم‌های غیرهدف دریایی ایجاد می‌کند (Harino, 2004; Konstantinou and Albanis, 2004). در همین راستا و با هدف شناسایی خطرات زیست‌محیطی و آسیب به ارگانسیم‌های غیرهدف دریایی اقدام شد.

### روش تحقیق

روش تحقیق براساس جستجوی اطلاعات مقالات منتشر شده در سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۲۳ در دنیا انجام و مقالات مرتبط با ضدجرم و زیست‌کش‌های رایج در این صنعت به ویژه زیست‌کش‌های آلی و چشم‌اندازهای این دانش با بررسی مقالات و کتاب‌های مرتبط بررسی شد. جستجو در Google Scholar و با عبارت‌های "Antifouling Paint"، "Antifouling"، "Biocides"، "Foul Release Coatings"، "Copper based Biocides" و "Booster Biocides Antifouling" انجام شد.

### نتایج

با گسترش سریع صنایع دریایی و با تشدید قوانین مربوط به استفاده از زیست‌کش‌های ضدجرم، مشکلات ضدجرم‌های دریایی افزایش یافته است. علف‌کش‌ها یا قارچ‌کش‌هایی که در حال حاضر در صنعت رنگ‌های دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در اصل برای استفاده در کشاورزی ساخته شده‌اند. بر این اساس، بسیاری از مطالعات وجود آفت‌کش‌ها و زیست‌کش‌ها را در آب‌های سطحی بررسی و نشان داده‌اند (Wittmer et al., 2011).

با حذف تدریجی فرمولاسیون‌های مبتنی بر تری‌ارگانوتین به عنوان مثال، تری‌بوتیل‌تین، مس به جزء اصلی زیست‌کش‌های اکثر رنگ‌های ضدجرم تبدیل شده است و معمولاً به شکل اکسید مس به کار می‌روند. روی غیرآلی اغلب در ترکیب با مس برای افزایش سمیت کلی فرمولاسیون یا تسهیل فرآیند شستشو استفاده می‌شود. زیست‌کش‌های تقویت‌کننده آلی مانند Irgarol 1051، Sea Nine 211، dichlofluanid، chlorothalonil، زینک پیریتیون و Zineb نیز به رنگ اضافه می‌شوند تا اثربخشی آن را افزایش دهند. زیست‌کش‌های ضدجرم اصلی مورد استفاده در صنایع دریایی و اثر آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. مطالعات متعددی سمیت زیست‌کش‌های تقویت‌کننده را بر روی گونه‌های غیرهدف ارزیابی کرده‌اند و دریافته‌اند که بیشتر آن‌ها مهارکننده‌های رشد برای آب شیرین و اتوتروف‌های دریایی هستند و بر گونه‌های کلیدی مانند علف‌های دریایی و مرجان‌ها تأثیر نامطلوب می‌گذارند. بنابراین، علاقه فزاینده‌ای به بررسی تأثیر این ترکیبات بر اکوسیستم‌های آبی وجود دارد (Rodríguez et al., 2011).

جدول ۱. زیست‌کش‌های اصلی ضد جرم مورد استفاده در صنایع دریایی و تأثیر آن‌ها بر آبزیان

نام‌های تجاری	کاربرد	عملکرد	گونه	اثرات
			سخت‌پوستان	
			<i>Cancer magister</i>	مرگ و میر لارو
			<i>Penaeus duorum</i>	مرگ و میر
			نرم‌تنان	
			<i>Crassostrea virginica</i>	عدم رشد لارو
			<i>Mytilus edulis</i>	سمیت جنینی
			تونیکات‌ها	سمیت جنینی مرگ و میر
کلروتالونیل	قارچ کش	مهار انتقال الکترون میتوکندریایی	<i>Ciona intestinalis</i>	سمیت جنینی مهار نشست لارو
			ماهیان استخوانی	
			<i>Anguilla japonica</i>	مرگ و میر
			<i>Cyprinodon variegatus</i>	مرگ و میر
			<i>Galaxias auratus</i>	مرگ و میر
			<i>Galaxias maculatus</i>	مرگ و میر
			<i>Galaxias truttaceus</i>	مرگ و میر
			<i>Leiostomus xanthurus</i>	مرگ و میر
			<i>Pseudaphritis urvillii</i>	مرگ و میر بچه ماهیان
			سخت‌پوستان	
			<i>Artemia salina</i>	مهار فعالیت آنزیم‌های Mg <sup>2+</sup> و Na/K ATPase ATPase
			نرم‌تنان	
			<i>Mytilus galloprovincialis</i>	تغییرات در فعالیت‌های Ca <sup>2+</sup> و Na/K ATPase ATPase
مس پیریتیون (CuPT)	میکروب کش	مهارکننده دارای چند جایگاه (فرایندهای متابولیک)	ماهیان استخوانی	
			<i>Fundulus heteroclitus</i>	تغییرات در تنظیم اسمزی آبشش
			<i>Oncorhynchus kisutch</i>	تغییرات در تنظیم اسمزی آبشش
			خارپوستان	
			<i>Glyptocidaris crenularis</i>	سمیت جنینی
			سخت‌پوستان	
			<i>Balanus amphitrite</i>	مرگ و میر لارو
			نرم‌تنان	
			<i>Crassostrea virginica</i>	عدم تحرک جنین-لارو
			<i>Mytilus edulis</i>	عدم تحرک جنین-لارو و سمیت جنینی
			خارپوستان	
			<i>Hemichentrotus pulcherrimus</i>	سمیت جنینی
			<i>Anthocidaris crassispina</i>	سمیت جنینی
			تونیکات‌ها	
			<i>Ciona intestinalis</i>	سمیت جنینی و مهار نشست لارو
			ماهیان استخوانی	
			<i>Cyprinodon variegatus</i>	مرگ و میر

جلیک‌ها				
سمی برای تولید مثل	<i>Scenedesmus vacuolatus</i>			
کاهش سطح کلروفیل a	میکروجلیک			
	planktonic	بازدارنده انتقال الکترون PS II	علف کش	دیورن
	periphytic			
اختلال در دستگاه عصبی مرکزی	ماهیان استخوانی			
	<i>Carassius auratus</i>			
جلیک‌ها				
کاهش رشد، مهار افزایش تعداد سلول‌ها و کاهش فعالیت فتوسنتزی	<i>Dunaliella tertiolecta</i>			
	<i>Synechococcus</i> sp.	بازدارنده انتقال الکترون PS II	علف کش	ایرگارول-۱۰۵۱
	<i>Emiliania huxleyi</i>			
	<i>Zostera marina</i>			
	<i>Fucus vesiculosus</i>			
	<i>Enteromorpha intestinalis</i>			
	<i>Ulva intestinalis</i>			
سمیت جنینی جنین لارو	ماهیان استخوانی	مهارکننده دارای چند جایگاه (فرایندهای متابولیک)	میکروب کش	زینک پیریتئون (ZnPT)
	<i>Oryzias latipes</i>			
	<i>Danio rerio</i>			
سمیت جنینی	ماهیان استخوانی	مهارکننده چند مرحله (فرایندهای متابولیک)	قارچ کش	Zineb
	<i>Salmo gairdneri</i>			

## بحث

کلروتالونیل (۲،۴،۵،۶-تتراکلرو ایزوفتالونیتریل) قارچ‌کشی است که به طور گسترده در کشاورزی و جنگل‌داری استفاده می‌شود. این ماده به عنوان یک زیست‌کش تقویت‌کننده در رنگ‌های دریایی به عنوان یکی از مواد شیمیایی جایگزین زیست‌کش‌های ارگانوتین استفاده می‌شود. کلروتالونیل یک قارچ‌کش با طیف وسیع  $K_{ow} = 2/64 - 4/28$  و حلالیت در آب  $0/9$  میلی‌گرم در لیتر است (da Silveira Guerreiro et al., 2017). کلروتالونیل می‌تواند به طور حاد سمی باشد به طوری که ۵۰ درصد غلظت کشندگی برای ماهی پس از ۹۶ ساعت قرارگرفتن در معرض آن، بسته به گونه و شرایط قرارگرفتن، سمیت در محدوده  $1/2$  تا  $76$  میکروگرم بر لیتر است. کلروتالونیل می‌تواند در بافت ماهی انباشته شود. فاکتورهای تجمع زیستی ۱۸ برای *Gnathopogon caeruleus* و ۲۵ برای کپور گونه *Cyprinus carpio* به دنبال مواجهه‌های کشنده ( $1/1 - 1/4$  میکروگرم بر لیتر) گزارش شده است. پیشنهاد شده است که لکوسیت‌ها ممکن است یک هدف بالقوه سمیت باشند، زیرا کاهش قابل توجهی در مقادیر لکوسیت در ماهی آب شیرین استرالیایی *Pseudaphritis urvulii* یافت شد که برای ۱۰ روز در معرض  $4/4$  میکروگرم بر لیتر کلروتالونیل قرار گرفت. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که قرار گرفتن ماکروفاژهای ماهی (*Morone saxatilis*) و هموسیت‌های اویستر با کلروتالونیل ( $10 \pm 500$  میکروگرم بر لیتر) باعث سرکوب گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) و غلظت اولیه نیکوتین آمید آدنین دی‌نوکلئیک فسفات (NADPH) می‌شود، اما فاگوسیتوز را مهار نمی‌کند. مطالعات زیادی در مورد اثر سمیت کلروتالونیل بر جانوران دریایی، از جمله سخت‌پوستان، نرم‌تنان، تونیکات‌ها و ماهیان استخوانی وجود دارد (Lee et al., 2022; Moon et al., 2019).

دی‌کلوفنید (N-dichlorofluoromethylthio-N0-dimethyl-N فنیل سولفامید) معمولاً به عنوان یک علف‌کش در محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. دی‌کلوفنید در مقایسه با سایر عوامل ضدجرم سمیت کمتری دارد، اگرچه برخی مطالعات اثرات سمی آن را مانند سمیت جنینی در توتیای دریایی گونه *Glyptocidaris crenularis*، شناسایی کرده‌اند (Guardiola et al., 2012).

یکی از زیست‌کش‌های جایگزین جدید، ۴،۵-دی‌کلرو-۲-n-اکتیل-۴-ایزوتیازولین-۳-ون (DCOIT)، ماده فعال عامل ضدجرم ۲۱۱ Sea Nine است که توسط شرکت Rohm و Haas ساخته شده است (Jacobson and Willingham, 2000). مطالعات رسوبات دریایی نشان می‌دهد که مسیر اصلی اتلاف DCOIT در محیط دریایی، تخریب زیستی سریع آن است. DCOIT عمدتاً در شرایط هوایی و بی‌هوایی با تخریب زیستی بیش از ۲۰۰ برابر سریعتر از هیدرولیز یا فوتولیز تحت تخریب زیستی قرار می‌گیرد. تجزیه زیستی یک مکانیسم بسیار مؤثر برای سم‌زدایی این ترکیب است زیرا متابولیت‌های حاصل پنج برابر کمتر از ترکیب اصلی سمی هستند (Bellas, 2007). با این حال، زیست‌کش Sea-Nine به طور حاد برای طیف وسیعی از موجودات آبرزی سمی است، اگرچه هیچ اثر سم‌شناسی مزمنی در آزمایشات سم‌شناسی گسترده انجام شده بر روی آن مشاهده نشده است. DCOIT دارای  $\log K_{ow} 2/8$  و حلالیت آبی ۱۴ میلی‌گرم بر لیتر است. مطالعات متعددی وجود دارد که سمیت و اثرات DCOIT را بر روی جانوران دریایی بررسی کرده است. این مطالعات موارد زیر را نشان دادند: مرگ و میر لارو در سخت‌پوستان، بی‌حرکتی لارو و سمیت جنینی در نرم‌تنان، سمیت جنینی در خارپوستان، سمیت جنینی و مهار نشست لاروی در تونیکات‌ها و مرگ و میر در ماهیان استخوانی (Chen et al., 2016; Moon et al., 2019).

دیورن (۱-۳،۴-دی‌کلروفنیل)-۳،۳-دی‌متیل‌اوره) در آب دریا پایدار می‌ماند، اما در رسوبات دریایی با نیمه عمر ۱۴ روز ماندگاری دارد. دیورن نسبتاً در آب محلول است (۳۵ میلی‌گرم بر لیتر) و دارای  $\log K_{ow} 2/8$  گزارش شده است. دیورن در غلظت‌های بالا در آب‌های سطحی دریایی وجود دارد، اما تنها در غلظت‌های پایین در رسوبات شناسایی شده است. دیورن در محیط‌های دریایی پایدار است و به خوبی بین آب و رسوبات تقسیم می‌شود، می‌تواند معلق بماند و برای جذب توسط موجودات دریایی در دسترس باشد. در حالی که اثر سمی علف‌کش دیورن برای موجودات آبرزی فتوسنتزی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است، اثرات کشندگی آن بر مراحل مختلف زندگی ماهی گزارش نشده است. ثابت شده است که دیورن برای تولید مثل جلبک سبز آب شیرین *Scenedesmus vacuolatus* بسیار سمی است. همچنین ثابت شده است که با کاهش سطح کلروفیل a بر ریزجلبک‌های پلانکتون و پری‌فیت تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، سمی بودن آن برای گونه‌های باکتریایی خاص ثابت شده است (Yun et al., 2023).

ایرگارول ۱۰۵۱ (2-methylthio-4-terbutylamino-6-cyclopropylamino-s triazine) یک علف‌کش نسبتاً چربی دوست است که به عنوان تقویت‌کننده با مس برای کنترل زیست‌جرم روی بدنه کشتی‌ها استفاده می‌شود. ایرگارول انتقال الکترون را در فتوسیسستم II با اتصال به پروتئین D<sub>1</sub> مهار می‌کند. ایرگارول ممکن است بر ارگانسیم‌های فتوسنتزی غیرهدف مانند فیتوپلانکتون، پری‌فیتون و ماکروفیت‌های آبی در هنگام شستشو در محیط دریایی تأثیر بگذارد. تنها چند مطالعه به تأثیر احتمالی ایرگارول بر جلبک‌های غیرهدف دریایی پرداخته‌اند. اثر ایرگارول بر جلبک‌های سبز *Dunaliella tertiolecta*، *Synechococcus sp* و *Emiliania huxleyi*، جوامع فیتوپلانکتون طبیعی، کلونی پری‌فیتون و گونه‌های فیتوپلانکتون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کاهش رشد، مهار تعداد سلول‌ها و کاهش فعالیت فتوسنتزی این ارگانسیم‌ها را نشان داد. این اثرات در بسیاری از گیاهان دریایی و جلبک‌های مختلف دیده شده است، مانند *Fucus serratus*، *Zostera marina* و *Enteromorpha intestinalis* (Ali et al., 2021).

خانواده پیریتینون (زینک و مس)، یکی از محبوب‌ترین زیست‌کش‌های جایگزین ضدجرم، مدت‌هاست که به طور گسترده به عنوان جلبک‌کش، باکتری‌کش و قارچ‌کش استفاده می‌شود. این خانواده برای گیاهان و جانوران آبرزی بسیار سمی است، اما فرض بر این بود که از نظر محیطی خنثی است زیرا می‌تواند به راحتی به ترکیبات کمتر سمی تبدیل شود. ثابت شده است که پیریتینون‌ها برای ماهی ماکای ژاپنی (*Oryzias latipes*) سمی است و همچنین باعث ایجاد اثرات آسیب‌زا مانند تغییر شکل نخاع در جنین و لارو گورخرماهی (*Danio rerio*) در غلظت‌های بسیار کم کشنده می‌شود (Paz-Villarraga et al., 2022). Zineb ((zinc ethylenebis-(dithiocarbamate)) یک قارچ‌کش پرکاربرد با کاربردهای کشاورزی و صنعتی اصلی است. Zineb برای استفاده در میوه‌ها، سبزیجات، محصولات زراعی، گیاهان زینتی و برای درمان بسیاری از دانه‌ها ثبت شده است. همچنین به عنوان قارچ‌کش در رنگ‌ها و برای کنترل کپک بر روی پارچه‌ها، چرم، کتان، سطوح رنگ شده و چوبی و غیره ثبت

شده است. حضور دی تیوکاربامات‌ها در محیط‌های ساحلی تا سال ۲۰۰۹ گزارش نشده بود، اگرچه مشخص است که این ترکیبات آسیب‌زا در جنین ماهی در غلظت‌های نسبتاً پایین سمیت نشان می‌دهند (Orzechowska et al., 2023). فناوری پوشش جرم‌رهش جایگزین عالی برای جلوگیری از چسبیدن موجودات به بدنه‌ی کشتی است. این پوشش‌ها ویژگی‌های امیدوارکننده‌ای از جمله عدم به کارگیری مواد زیست‌کش، دوام شیمیایی، افزایش سرعت شناور، کاهش مصرف سوخت و کنترل طولانی مدت چسبندگی موجودات را نشان می‌دهد که هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهد (Anderson et al., 2003). پوشش‌های جرم‌رهش در سال ۱۹۸۰ ظهور یافته و در سال ۱۹۹۶ برای تأمین نیاز ترابری دریایی به صورت تجاری استفاده شد (Anderson, 2009). مفهوم توسعه سطوح جرم‌رهش برای بیش از سه دهه محبوب بود. ویژگی‌های پوشش‌های جرم‌رهش در پلیمرهایی بر پایه‌ی ساختارهای فلوریت و پلی‌سیلوکسانی تا حد زیادی نشان داده شده است. سطوح با پایه‌ی فلورو عدم تخلخل، کاهش انرژی آزاد و ویژگی‌های عدم چسبندگی را نشان می‌دهد. بنابراین، آن‌ها از تحرک ساختاری محدود ناشی از اتم‌های سخت فلورین رنج می‌برند. اتم‌های فلورین قادر به چرخیدن در اطراف پیوندهای پلیمری نیستند (Gittens et al., 2013). بنابراین رها کردن ارگانوسیم‌های چسبیده به دلیل افزایش مدول کشسان و سفتی، کار ساده‌ای نیست (Tuteja et al., 2007).

### نتیجه‌گیری

نگرانی در مورد تأثیر رنگ‌های حاوی زیست‌کش بر محیط‌زیست، تحقیقات کنونی را به سمت راه‌حل‌های ضد جرم سازگار با محیط زیست سوق می‌دهد. زیست‌کش‌های مبتنی بر مس به طور گسترده در رنگ‌های ضد جرم در صنایع دریایی استفاده می‌شوند. استفاده از این رنگ‌ها به دلیل تجمع زیستی مس در بی‌مهرگان، بافت ماهیچه‌ای و کبد ماهی بحث برانگیز شده است (Vaz et al., 2019). صنایع دریایی به سمت کاهش ادغام ترکیبات مبتنی بر مس و زیست‌کش‌های تقویت‌کننده در رنگ‌های ضد جرم و ارائه راه‌حل جایگزین حرکت می‌کند. فناوری پوشش جرم‌رهش جایگزین عالی برای جلوگیری از چسبیدن موجودات به بدنه کشتی است. این پوشش‌ها ویژگی‌های امیدوارکننده‌ای از جمله عدم به کارگیری مواد زیست‌کش، دوام شیمیایی، افزایش سرعت شناور، کاهش مصرف سوخت و کنترل طولانی مدت چسبندگی موجودات را نشان می‌دهد که هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهد. امید است در آینده پوشش‌های جرم‌رهش دوست‌دار محیط زیست جایگزین رنگ‌های ضد جرم کنونی شود.

### تشکر و قدردانی

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

### References

- ACTION, I. (2020). World Fisheries and Aquaculture.
- Ali, H. R., Ariffin, M. M., Omar, T. F. T., Ghazali, A., Sheikh, M. A., Shazili, N. A. M., & Bachok, Z. (2021). Antifouling paint biocides (Irgarol 1051 and diuron) in the selected ports of Peninsular Malaysia: occurrence, seasonal variation, and ecological risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(37), 52247-52257. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14424-1>
- Anderson, C. (2009). Fouling control coatings using low surface energy, foul release technology. In *Advances in marine antifouling coatings and technologies* (pp. 693-708). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845696313.4.693>
- Anderson, C., Atlar, M., Callow, M., Candries, M., Milne, A., & Townsin, R. (2003). The development of foul-release coatings for seagoing vessels. In *Proceedings of the Institute of Marine Engineering, Science and Technology. Part B, Journal of Marine Design and Operations* (Vol. 2003, No. B4, pp. 11-23).
- Ara, J., Jewel, A., Hossain, A., & Ayenuddin, M. (2020). Determination of suitable species for cage fish farming in Chalan beel, Bangladesh. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 8(2), 315-320.
- Bannister, J., Sievers, M., Bush, F., & Bloecher, N. (2019). Biofouling in marine aquaculture: a review of recent research and developments. *Biofouling*, 35(6), 631-648. <https://doi.org/10.1080/08927014.2019.1640214>



- Bellas, J. (2007). Toxicity of the booster biocide Sea-Nine to the early developmental stages of the sea urchin *Paracentrotus lividus*. *Aquatic Toxicology*, 83(1), 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2007.03.011>
- Callow, J. A., & Callow, M. E. (2011). Trends in the development of environmentally friendly fouling-resistant marine coatings. *Nature Communications*, 2(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/ncomms1251>
- Chen, L., Zhang, W., Ye, R., Hu, C., Wang, Q., Seemann, F., Au, D. W., Zhou, B., Giesy, J. P., & Qian, P.-Y. (2016). Chronic exposure of marine medaka (*Oryzias melastigma*) to 4, 5-dichloro-2-n-octyl-4-isothiazolin-3-one (DCOIT) reveals its mechanism of action in endocrine disruption via the hypothalamus-pituitary-gonadal-liver (HPGL) axis. *Environmental Science & Technology*, 50(8), 4492-4501. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01137>
- da Silveira Guerreiro, A., Rola, R. C., Rovani, M. T., da Costa, S. R., & Sandrini, J. Z. (2017). Antifouling biocides: impairment of bivalve immune system by chlorothalonil. *Aquatic Toxicology*, 189, 194-199. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.06.012>
- De Nys, R., & Guenther, J. (2009). The impact and control of biofouling in marine finfish aquaculture. In *Advances in marine antifouling coatings and technologies* (pp. 177-221). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845696313.1.177>
- Duan, Y., Wu, J., Qi, W., & Su, R. (2022). Eco-friendly marine antifouling coating consisting of cellulose nanocrystals with bioinspired micromorphology. *Carbohydrate Polymers*, 120504. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120504>
- Eslami, B., Irajizad, P., Jafari, P., Nazari, M., Masoudi, A., Kashyap, V., Stafslie, S., & Ghasemi, H. (2019). Stress-localized durable anti-biofouling surfaces. *Soft Matter*, 15(29), 6014-6026. DOI <https://doi.org/10.1039/C9SM00790C>
- Fitridge, I., Dempster, T., Guenther, J., & De Nys, R. (2012). The impact and control of biofouling in marine aquaculture: a review. *Biofouling*, 28(7), 649-669. <https://doi.org/10.1080/08927014.2012.700478>
- Gittens, J. E., Smith, T. J., Suleiman, R., & Akid, R. (2013). Current and emerging environmentally-friendly systems for fouling control in the marine environment. *Biotechnology Advances*, 31(8), 1738-1753. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.09.002>
- Guardiola, F. A., Cuesta, A., Meseguer, J., & Esteban, M. A. (2012). Risks of using antifouling biocides in aquaculture. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(2), 1541-1560. <https://doi.org/10.3390/ijms13021541>
- Harino, H. (2004). Occurrence and degradation of representative TBT free-antifouling biocides in aquatic environment. *Coastal Marine Science*, 29(1), 28-39.
- IMO, I. (2001). International convention on the control of harmful anti-fouling systems on ships. *International Maritime Organisation (IMO)*.
- Jacobson, A. H., & Willingham, G. L. (2000). Sea-nine antifoulant: an environmentally acceptable alternative to organotin antifoulants. *Science of the Total Environment*, 258(1-2), 103-110. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00511-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00511-8)
- Kiil, S., Weinell, C. E., Pedersen, M. S., & Dam-Johansen, K. (2001). Analysis of self-polishing antifouling paints using rotary experiments and mathematical modeling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40(18), 3906-3920. <https://doi.org/10.1021/ie010242n>
- Konstantinou, I., & Albanis, T. (2004). Worldwide occurrence and effects of antifouling paint booster biocides in the aquatic environment: a review. *Environment International*, 30(2), 235-248. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00176-4](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00176-4)
- Lee, S., Saravanan, M., Kim, S.-A., & Rhee, J.-S. (2022). Long-term exposure to antifouling biocide chlorothalonil modulates immunity and biochemical and antioxidant parameters in the blood of olive flounder. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 257, 109337. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2022.109337>
- Martins, S. E., & Martins, C. d. M. G. (2021). Antifoulants and disinfectants. In *Aquaculture Toxicology* (pp. 25-58). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821337-7.00005-0>
- Moon, Y.-S., Kim, M., Hong, C. P., Kang, J.-H., & Jung, J.-H. (2019). Overlapping and unique toxic effects of three alternative antifouling biocides (Diuron, Irgarol 1051®, Sea-Nine 211®) on non-target marine fish. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 180, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.04.070>

- Orzechowska, A., Czaderna-Lekka, A., Trtílek, M., & Rusiniak, P. (2023). Fluorescence analysis of biocide efficiency in antifouling coatings against cyanobacteria. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5), 4972. <https://doi.org/10.3390/ijms24054972>
- Paz-Villarraga, C. A., Castro, Í. B., & Fillmann, G. (2022). Biocides in antifouling paint formulations currently registered for use. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17662-5>
- Pistone, A., Scolaro, C., & Visco, A. (2021). Mechanical properties of protective coatings against marine fouling: A review. *Polymers*, 13(2), 173. <https://doi.org/10.3390/polym13020173>
- Qian, P.-Y., Chen, L., & Xu, Y. (2013). Mini-review: Molecular mechanisms of antifouling compounds. *Biofouling*, 29(4), 381-400. <https://doi.org/10.1080/08927014.2013.776546>
- Readman, J. W. (2006). Development, occurrence and regulation of antifouling paint biocides: historical review and future trends. *Antifouling Paint Biocides*, 1-15. [https://doi.org/10.1007/698\\_5\\_047](https://doi.org/10.1007/698_5_047)
- Sánchez-Rodríguez, Á., Sosa-Ferrera, Z., Santana-del Pino, Á., & Santana-Rodríguez, J. J. (2011). Probabilistic risk assessment of common booster biocides in surface waters of the harbours of Gran Canaria (Spain). *Marine Pollution Bulletin*, 62(5), 985-991. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.02.038>
- Sankar, G. G., Sathya, S., Murthy, P. S., Das, A., Pandiyan, R., Venugopalan, V., & Doble, M. (2015). Polydimethyl siloxane nanocomposites: their antifouling efficacy in vitro and in marine conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 104, 307-314. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.05.022>
- Singh, D., Rehman, N., & Pandey, A. (2023). Nanotechnology: the Alternative and Efficient Solution to Biofouling in the Aquaculture Industry. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-04274-z>
- Tuteja, A., Choi, W., Ma, M., Mabry, J. M., Mazzella, S. A., Rutledge, G. C., McKinley, G. H., & Cohen, R. E. (2007). Designing superoleophobic surfaces. *Science*, 318(5856), 1618-1622. [10.1126/science.1148326](https://doi.org/10.1126/science.1148326)
- Vaz, C., Afonso, F., Barata, M., Ribeiro, L., Pousão-Ferreira, P., & Soares, F. (2019). Effect of copper exposure and recovery period in reared *Diplodus sargus*. *Ecotoxicology*, 28(9), 1075-1084. <https://doi.org/10.1007/s10646-019-02109-y>
- Wittmer, I. K., Scheidegger, R., Bader, H.-P., Singer, H., & Stamm, C. (2011). Loss rates of urban biocides can exceed those of agricultural pesticides. *Science of the Total Environment*, 409(5), 920-932. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.11.031>
- Yang, W. J., Neoh, K.-G., Kang, E.-T., Teo, S. L.-M., & Rittschof, D. (2014). Polymer brush coatings for combating marine biofouling. *Progress in Polymer Science*, 39(5), 1017-1042. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.02.002>
- Yebra, D. M., Kiil, S., & Dam-Johansen, K. (2004). Antifouling technology—past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. *Progress in Organic Coatings*, 50(2), 75-104. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.06.001>
- Yebra, D. M., Kiil, S., Weinell, C. E., & Dam-Johansen, K. (2006). Effects of marine microbial biofilms on the biocide release rate from antifouling paints—A model-based analysis. *Progress in Organic Coatings*, 57(1), 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2006.06.003>
- Yilgör, E., & Yilgör, I. (2014). Silicone containing copolymers: Synthesis, properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 39(6), 1165-1195. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.11.003>
- Yun, Y.-J., Kim, S.-A., Kim, J., & Rhee, J.-S. (2023). Acute and Chronic Effects of the Antifouling Booster Biocide Diuron on the Harpacticoid Copepod *Tigriopus japonicus* Revealed through Multi-Biomarker Determination. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 1861. <https://doi.org/10.3390/jmse11101861>