مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲

ISSN 2716-9804 الکترونیکی، ISSN 2717-0632 چاپی

بررسی پتانسیل سموم حاصل از رشد سیانوباکتری‌ها در بیوتروریسم: لزوم اتخاذ راهکارهای مدیریتی‌حفاظتی در رابطه با افراد شاغل در مراکز آبزی‌پروری

نوع مقاله:مروری

علیرضا رادخواه[۱]، سهیل ایگدری*[۱]، هادی پورباقر[۱]، صدیقه آتش‌افرازه[۲]

۱- گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- کارشناسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

soheil.eagderi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹

صفحه ۸۰-۵۵

چکیده

جلبک‌های سبزآبی یا سیانوباکتری‌ها قادر به رشد سریع در آب‌های گرم و غنی از مواد مغذی هستند. رشد تصاعدی سیانوباکتری‌ها در پیکره‌های آبی، تحت تاثیر عوامل مختلف از جمله فراوانی بیش از حد مواد مغذی، دمای بالا و نور زیاد خورشید قرار دارد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که با افزایش رشد سیانوباکتری‌ها در سیستم‌های آبی، امکان افزایش سموم حاصل از آن‌ها نیز وجود دارد که می‌تواند اثرات نامطلوبی روی سلامت آبزیان و به‌ویژه انسان داشته باشد. با توجه به اهمیت سلامت کارکنان و افراد محلی در محیط‌های دریایی و همچنین کارگران شاغل در مراکز آبزی‌پروری، پژوهش حاضر با هدف معرفی مهم‌ترین و شایع‌ترین سموم حاصل از رشد سیانوباکتری‌ها و همچنین بررسی خطرات ناشی از آن‌ها به‌منظور تعیین پتانسیل این سموم در بیوتروریسم به اجرا درآمد. برای این منظور، ۱۲ نوع سم حاصل از رشد سیانوباکتری‌ها شامل میکروسیستین (microcystin)، ندولارین (nodularin)، آناتوکسین-ای (anatoxin-a)، هوموآناتوکسین (homoanatoxin)، اُسیلاتوکسین ای (oscillatoxin A)، سیلندراسپرموپسین (cylindrospermopsin)، ناکینونز ای-سی (nakienones A-C)، آفانتوکسین (aphantoxin)، سیتوفیسین و لینگبیاتوکسین (scytophycin/lyngbyatoxin)، آپلی‌سیاتوکسین (aplysiatoxin) و دیبرومو آپلی سیاتوکسین (debromoaplysiatoxin) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در بین سموم مذبور، میکروسیستین در مقایسه با سایرین بیشترین توجه را در پژوهش‌ها علمی به خود اختصاص داده است که علت این موضوع را می‌توان به شیوع جهانی این سم و تأثیرات آن بر سلامت انسان مرتبط دانست. اثرات میکروسیستین اغلب در قالب بیماری‌های گوارشی، آسیب کبدی و عصبی و ایجاد سرطان بروز یافته است. با توجه به اثرات نامطلوب این سموم، لزوم به‌کارگیری تکنیک‌های مختلف به‌منظور کنترل و کاهش خطرات ناشی از رشد سیانوباکتری‌ها و همچنین، اتخاذ تصمیمات و راهبردهای مدیریتی مناسب در رابطه با سلامت کارکنان دریایی، افراد شاغل در مراکز آبزی‌پروری که در معرض رشد سیانوباکتری‌ها و سموم حاصل از آن‌ها قرار دارند، امری ضروری است.

واژه‌های کلیدی: سیانوباکتری‌ها، سموم زیستی، میکروسیستین، کارگران آبزی‌پروری، بیوتروریسم

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

مقدمه

بیوتروریسم نوعی تروریسم است که از عوامل زیستی مانند باکتری‌ها، ویروس‌ها و سموم به‌عنوان سلاحی علیه انسان‌ها، حیوانات و محصولات کشاورزی استفاده می‌کند (Radkhah and Eagderi, 2022a). مانند سایر اشکال تروریسم، هدف بیوتروریسم ایجاد رُعب و وحشت در اقشار مختلف جامعه و مقامات غیرنظامی و همچنین تحقق خواسته‌های سیاسی، مذهبی و ایدئولوژیک مورد انتظار تروریست‌ها است (Williams et al. 2023). اثرات اصلی بیوتروریسم بیماری‌هایی است که اغلب منجر به مرگ، آلودگی آب، غذا و خاک می‌شود (Rathish et al. 2023). علاوه‌بر این، چنین حملاتی باعث وحشت و ترس در میان مردم، هرج و مرج در بسیاری از عرصه‌های زندگی و خسارات اقتصادی قابل توجه می‌شود (Janik et al. 2019). جلبک‌های سبزآبی یا سیانوباکتری‌ها گروه خاصی از جلبک‌ها هستند که به‌طور طبیعی در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، تالاب‌ها، مزارع پرورش آبزیان مختلف به‌ویژه ماهیان گرم آبی و منابع آبی وجود دارند (Radkhah and Eagderi, 2019). تغییرات محیطی ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌تواند رشد سیانوباکتری‌ها را تسریع بخشد. مطالعات مختلف نشان داده است که رودخانه‌ها و حتی آب لوله‌کشی منازل می‌تواند شامل سیانوباکتری‌ها باشد (Bonilla et al. 2023). این باکتری‌های کوچک می‌توانند به‌سرعت در آب گرم و غنی از مواد مغذی شکوفا شوند و حیات آبزیان و انسان را به‌خطر بیندازند(Radkhah and Eagderi, 2020). امروزه، سموم تولید شده توسط سیانوباکتری‌ها به‌دلیل سمیت و همچنین، ظرفیت فوق‌العاده بالایی که در آسیب رساندن به موجودات آبزی و انسان دارند، مورد توجه جوامع علمی قرار گرفته‌اند (Khalifa et al. 2021). کارکنان و افراد شاغل در محیط‌های دریایی و مزارع پرروش آبزیان به‌دلیل مواجهه با آب آلوده و موجودات زنده در معرض طیف وسیعی از خطرات زیستی قرار دارند (Radkhah and Eagderi, 2022b). یکی از مهم‌ترین خطرات بالقوه در اکوسیستم‌های دریایی و مراکز آبزی‌پروری، افزایش رشد برخی از جلبک‌ها از جمله سیانوباکتری‌ها است (Radkhah et al. 2022, 2023) که می‌تواند زمینه‌ساز مشکلات مختلف زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی باشد. افزایش رشد سیانوباکتری‌ها در اکوسیستم‌های آبی می‌تواند باعث تولید سموم مختلفی شود که سلامت جانوران و انسان را به‌خطر می‌اندازد (Igwaran et al. 2024).

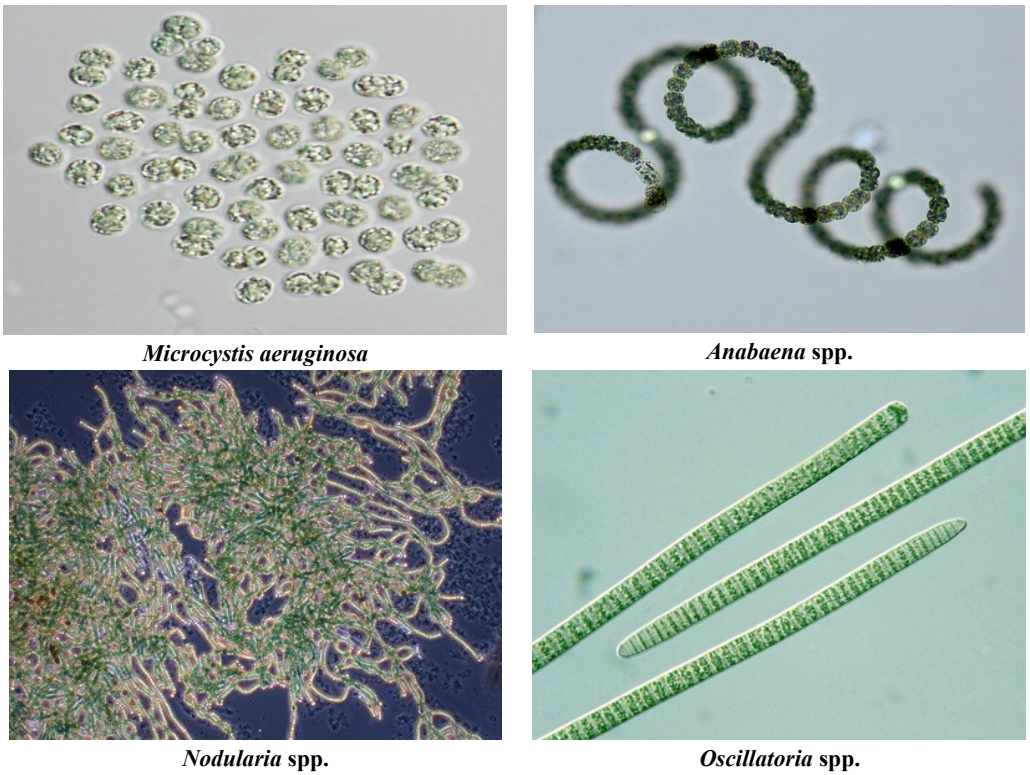
با توجه به اهمیت سلامت کارکنان و افراد شاغل در محیط‌های دریایی و آبزی‌پروری (Radkhah et al. 2023)، پژوهش حاضر با هدف معرفی مهم‌ترین و شایع‌ترین سموم حاصل از رشد

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

سیانوباکتری‌ها و همچنین بررسی خطرات ناشی از آن‌ها به‌منظور ارزیابی پتانسیل این سموم در پدیده بیوتروریسم اجرا شده است. در این پژوهش، روش‌های مختلف برای مدیریت و کنترل رشد سیانوباکتری‌ها و اثرات سمی آن‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته است.

افزایش رشد سیانوباکتری‌ها در اکوسیستم‌های آبی

سیانوباکتری‌ها یا جلبک‌های سبز آبی (شکل ۱) موجودات فتوسنتزکننده و پروکاریوتی هستند که در میان موجودات پیشگام سیاره زمین قرار دارند. این گروه از موجودات حداقل ۲/۷ میلیارد سال است که بر روی زمین وجود داشته‌اند (Radkhah and Eagderi, 2019). سیانوباکتری‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین تولیدکنندگان اولیه مواد آلی و همچنین، اولین موجوداتی که اکسیژن را در جو آزاد کرده‌اند، شناخته شده‌اند (Demoulin et al. 2019).



شکل ۱- گونه‌های مختلف سیانوباکتری (Baker. 2012; iNaturalist. 2024)

یکی از ویژگی‌های جالب سیانوباکتری‌ها، توزیع جغرافیایی وسیع آن‌ها است که نشان‌دهنده تنوع ژنوتیپی و فنوتیپی این گروه است (Taton et al. 2003). این جلبک‌ها را می‌توان در محیط‌های دریایی و مزارع پرورش آبزیان یافت، البته بسیاری از گونه‌ها قادر به حیات در زیستگاه‌های خشکی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

نیز هستند. علاوه‌بر این، گونه‌های دیگر می‌توانند تحت تنش‌های محیطی مانند شرایط خاص قطب جنوب یا چشمه‌های آب گرم، یا حتی برای مدت طولانی در تاریکی کامل زنده بمانند (Mutalipassi et al. 2021). صخره‌های مرجانی، نمونه‌ای از زیستگاه‌هایی هستند که به‌دلیل ظرفیت آن‌ها برای تحمل شرایط محیطی خاص مرتبط با اثرات انسانی و تغییرات اقلیمی، محل رشد سیانوباکترها هستند. این گروه از موجودات قادر به تحمل تغییرات گسترده در شوری و دما هستند و همچنین توانایی آن‌ها برای زنده ماندن در شدت نور کم به آن‌ها مزیت رقابتی بسیار خاصی در این محیط‌ها می‌دهد (Harvey et al. 2018). پژوهش‌های اخیر نیز نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی می‌تواند به نفع گونه‌های سیانوباکتری خطرناک باشد و نرخ رشد، غالبیت، توزیع جغرافیایی و فعالیت آن‌ها را افزایش دهد (Paerl and Huisman, 2009).

سیانوباکتری‌ها می‌توانند به سرعت در آب‌های سطحی تکثیر شوند و زمانی‌که شرایط مساعد حاکم باشد (Zanchett and Oliveira-Filho, 2013)، امکان رشد بیشتر پیدا می‌کنند (شکل ۲). شرایط مساعد برای رشد سیانوباکتری‌ها می‌تواند شامل دمای بالا، نور شدید، pH بالا و افزایش دسترسی به مواد مغذی، به‌ویژه فسفر و نیتروژن باشد که به‌طور مصنوعی به‌واسطه فعالیت‌های انسانی به درون اکوسیستم‌های آبی آزاد می‌شوند (Falconer. 2005). افزایش بی‌رویه رشد سیانوباکتری‌ها می‌تواند برای انسان و سایر حیوانات و برای موجودات آبزی خطرناک باشد، زیرا برخی از گونه‌های سیانوباکتری متابولیت‌های ثانویه بسیار سمی به نام سیانوتوکسین تولید می‌کنند. سیانوتوکسین‌ها می‌توانند اثرات مضری بر سلامت مصرف‌کنندگان داشته باشند. مصرف آب آشامیدنی آلوده و تغذیه از غذاهای دریایی و محصولات شیلاتی تولیدشده در مراکز آبزی‌پروری از جمله عواملی هستند که امکان مواجهه انسان با سموم سیانوباکتری‌ها را افزایش می‌دهند (Mulvenna et al. 2012).

بسیاری از سیانوباکتری‌ها به شکل رشته‌هایی (شکل ۱) یافت می‌شوند که می توانند تأثیر مکانیکی بر فرآیند فیلتراسیون موجودات آبزی مانند زئوپلانکتون‌ها داشته باشند (Zanchett and Oliveira-Filho. 2013). برخی از گونه‌ها یا سویه‌های سیانوباکتری حاوی سمومی هستند که حیات موجودات آبزی را به‌خطر می‌اندازند. اثرات حاد این سموم می‌تواند شامل کاهش بقا و اختلال در حرکات شنا یا حتی فلج کامل باشد (Igwaran et al. 2024). علاوه‌بر این، اثرات مزمن نیز شامل کاهش باروری و نرخ رشد جمعیت است که می‌تواند در نتیجه‌ی غلظت‌های کُشنده ایجاد شود. با این حال، اثرات ناشی از سمیت سیانوباکتری‌ها

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

به گونه، نوع سم تولید شده و غلظت آن بستگی دارد (Zanchett and Oliveira-Filho. 2013).



شکل ۲- نمونه‌هایی از رشد سیانوباکتری‌ها در اکوسیستم‌های آبی (Harmful Algal Blooms, 2023)

سموم

سموم مولکول‌های زیستی هستند که توسط باکتری‌ها، قارچ‌ها، حشرات، گیاهان، مهره‌داران و حیوانات بی‌مهره تولید می‌شوند که به‌طور عمده برای اهداف دفاعی هستند. این مولکول ها با استنشاق، تزریق، بلع یا جذب، اثرات مضری را در سایر موجودات زنده ایجاد می‌کنند (Tetreau. 2018). بسیاری از آن‌ها بر روی سیستم عصبی تأثیر می‌گذارند و هدایت تکانه‌های عصبی را مختل می‌کنند. سموم دیگر باعث آسیب به غشای سلولی و در نتیجه اختلال در عملکرد بافت‌ها و اندام‌ها می‌شوند. اثرات چنین سمومی اغلب غیرقابل برگشت است و باعث آسیب دائمی به سلامت انسان و سایر موجودات می‌شود (Janik et al. 2019). در مقایسه با بیماریزاها، سموم زیستی نیز به‌عنوان عوامل بیوتروریسم طبقه‌بندی می شوند. سموم در سلامت، غذا و در بخش امنیت انسان قابل توجه هستند. برخی از آن‌ها با مسمومیت‌های طبیعی در ارتباط هستند. سموم عوامل اتیولوژیک (etiological factors) بسیاری از مسمومیت‌های غذایی هستند که به‌عنوان مثال توسط انتروتوکسین‌های استافیلوکوک *Staphylococcal enterotoxin(Ses)* ایجاد می‌شوند (Ramage and Pillai, 2015). با این‌حال، این مواد به‌دلیل غلظت‌های کُشنده بسیار خطرناک هستند. پتانسیل کُشنده یک سم زیستی بر حسب مقدار ماده مورد نیاز برای کُشتن ۵۰ درصد از گروهی از حیوانات آزمایشی (معمولاً موش) اندازه‌گیری می‌شود (Janik et al. 2019)

سموم حاصل از رشد سیانوباکتری‌ها

سموم خطرناکی که سیانوتوکسین نیز نامیده می‌شوند با چندین مشکل در رابطه با سلامتی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

انسان از جمله سرطان، آسیب کبدی، مشکلات عصبی، بثورات و تحریک پوست مرتبط هستند (Rastogi et al. 2015). هپاتوتوکسین‌ها (hepatotoxins)، نوروتوکسین‌ها (hepatotoxins) درماتوتوکسین‌ها (dermatotoxins) سیتوتوکسین‌ها (cytotoxins)، اندوتوکسین‌ها (endotoxins) معمول‌ترین سیانوتوکسین‌هایی هستند که همراه با رشد سیانوباکتری‌ها در پیکره‌های آبی تولید می‌شوند (Sivonen and Jones, 1999). هپاتوتوکسین‌ها و نوروتوکسین‌ها دو مورد از سموم شایع سیانوباکتری‌ها هستند. هپاتوکسین‌ها مواد مضری هستند که به کبد آسیب می‌رسانند و می‌توانند منجر به حالت تهوع، استفراغ و در موارد شدید زردی شوند. هنگامی‌که سیستم عصبی توسط نوروتوکسین‌ها مورد هدف قرار می‌گیرد، علائمی مانند سردرد، حالت تهوع، ضعف عضلانی و حتی فلج می‌تواند در اثر قرار گرفتن در معرض غلظت‌های بیش از حد ایجاد شود (Zanchett and Oliveira-Filho, 201). علاوه‌بر این، سموم موردنظر تاثیرات قابل توجهی بر سیستم تولیدمثلی انسان دارند به‌طوری‌که به سیستم تناسلی مردان و زنان آسیب می‌رسانند. بر طبق پژوهش‌های انجام‌شده، اگر زنان باردار در معرض سطوح خطرناک سیانوباکتری‌ها قرار گیرند، این امر می‌تواند منجر به سقط جنین شود (Thomas. 1986).

میکروسیستین یکی از شایع‌ترین هپاتوکسین‌های تولیدشده توسط سیانوباکتری‌ها است. مواد شیمیایی هپاتوتوکسیک در طول رشد سیانوباکتری‌ها در آب تجمع می‌یابند. با ورود این مواد خطرناک به درون آب، امکان انتقال آن‌ها به بدن انسان به‌واسطه مصرف آب آشامیدنی آلوده یا استنشاق آن وجود دارد (Falfushynska et al. 2023). هنگامی‌که یک سم وارد جریان خون می‌شود و در کبد تجمع می‌یابد، با پاره‌شدن غشای آن‌ها به سلول‌های کبد آسیب می‌رساند. درد شکم، حالت تهوع و استفراغ و همچنین ضعف، خستگی، ادرار تیره و آنزیم‌های کبدیِ غیرطبیعی از علائم این اختلال هستند. نارسایی حاد کبد و احتمالاً مرگ می‌تواند در مسمومیت شدید با میکروسیستین (microcystin) اتفاق بیافتد (Sivonen and Jones, 1999; Rastogi et al. 2015). هنگام مصرف مواد غذایی از آب آلوده، مسمومیت نوروتوکسیک صدف (NSP: neurotoxic shellfish poisoning) که توسط سیانوتوکسینِ آناتوکسین- A (Anatoxin-A) ایجاد می‌شود، یک دلیل جدی برای نگرانی است (Watkins et al. 2008). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که آناتوکسین-A به گیرنده‌های نیکوتینی استیل کولین متصل می‌شود. این اتصال منجر به فلج‌شدن نورون‌های حرکتی می‌شود که می‌تواند باعث مشکلات هماهنگی، ضعف و در موارد شدید حتی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

مرگ شود. با این حال، ممکن است تا ۱۲ ساعت طول بکشد تا علائم ظاهر شوند. این علائم شامل تهوع، استفراغ، سردرد و سرگیجه است (Metcalf et al. 2021). هنگامی‌که آناتوکسین‌ها در غلظت‌های بالا مصرف شوند، می‌توانند باعث نارسایی تنفسی و فلج عضلانی شوند که اگر فوراً درمان نشود، می‌تواند به‌سرعت منجر به مرگ شود. در ادامه، سموم شایع تولید شده به‌واسطه رشد بی‌رویه سیانوباکتری‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد (Thawabte et al. 2023).

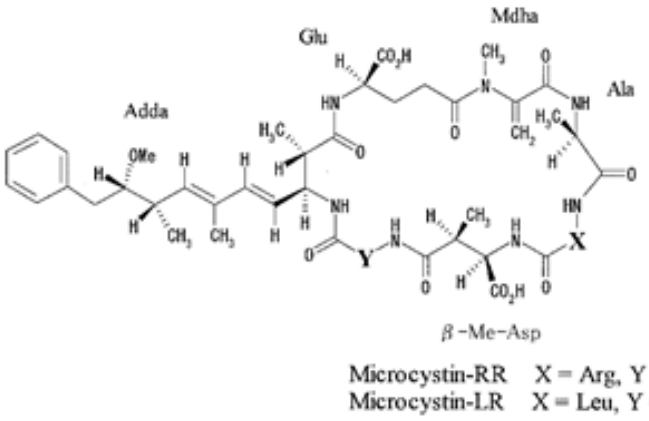
۱- میکروسیستین (microcystin)

دسته‌ای از هپاتوتوکسین‌های حلقوی معروف به میکروسیستین‌ها توسط بسیاری از گونه‌های سیانوباکتری از جمله *Planktothrix* spp.، *Microcystis aeruginosa* و *Anabaena* spp. تولید می‌شوند. جنس *Microcystis* یکی از جنس‌های متعلق به سیانوباکتری‌ها است که اغلب به‌واسطه رشد بی‌رویه منجر به آلودگی منابع با سیانوتوکسین می‌شود (Oksanen et al. 2004). پپتیدهای کوچکی که به نام میکروسیستین‌ها شناخته می‌شوند، را می‌توان با توجه به ترکیب اسید آمینه مولکول‌هایشان به گروه‌های ساختاری مختلفی طبقه‌بندی کرد (Sangolkar et al.2006)

Microcystin-LR که دارای یک اسید آمینه لوسین (L) و یک اسید آمینه آرژنین (R) در ساختار خود است (شکل ۳)، نوعی میکروسیستین بسیار سمی به‌شمار می‌رود. از جمله دیگر انواع میکروسیستین می‌توان به microcystin-LA، microcystin-RR، microcystin-LF و microcystin-YR اشاره کرد (Ozawa et al. 2003).

میکروسیستین‌ها برای سلول‌های کبد سمی هستند و می‌توانند باعث آسیب جدی به کبد یا حتی سرطان کبد در انسان و جانوران شوند. آن‌ها پروتئین فسفاتازها را که مسئول حذف گروه‌های فسفات از پروتئین‌ها هستند، مهار می‌کنند. به‌دلیل تجمع پروتئین‌های فسفریله در سلول‌های کبد، عملکرد طبیعی سلول مختل می‌شود که برای کبد مضر است. بر طبق پژوهش‌ها و گزارش‌های به دست آمده، کلیه، سیستم تولیدمثل و کبد تحت تأثیر میکروسیستین‌ها قرار می‌گیرند (Arman and Clarke. 2021). از طریق مصرف آب آلوده، تماس با پوست یا استنشاق قطرات آئروسل که حاوی سم هستند، افراد در معرض میکروسیستین‌ها قرار می‌گیرند. اگرچه کشورهای مختلف استانداردها و قوانین خود را در مورد سیانوتوکسین‌ها در آب آشامیدنی دارند اما با این حال، سازمان جهانی بهداشت (WHO: World Health Organization) مقدار مجاز میکروسیستین-LR در آب آشامیدنی را ۱ میکروگرم در لیتر تعیین کرده است (Environmental Protection Agency. 2014).

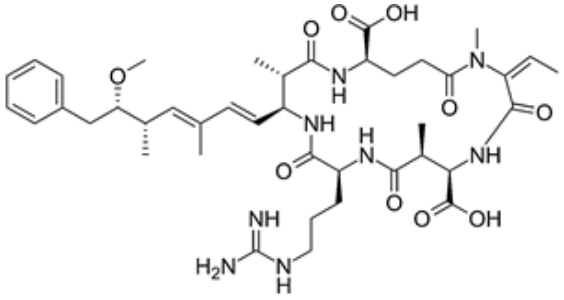
[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]



شکل ۳- ساختار شیمیایی Microcystin-RR و Microcystin-LR. میکروسیستین‌ها به‌طور عمده در دو اسید آمینه متفاوت هستند که با علامت اختصاری بین المللی مشخص می‌شوند؛ L: لوسین، R: آرژنین (Ozawa et al. 2003)

۲- ندولارین (nodularin)

جلبک‌های *Nodularia spumigena*، *Nodularia moravica* و *Nodularia harveyana* سه گونه از سیانوباکتری‌هایی هستند که ندولارین، یک هپاتوتوکسین حلقوی، را تولید می‌کنند. این متابولیت، سمیتی مشابه میکروسیستین را نشان می‌دهد و از نظر ساختاری (شکل ۴) با آن یکسان است (Brezeștean et al. 2022). ندولارین نیز پروتئین فسفاتازها را مهار می‌کند. این امر باعث می‌شود که پروتئین‌های فسفریله در سلول‌های کبدی تجمع یافته و به کبد آسیب برساند. ندولارین سایر اندام‌ها از جمله کلیه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و با ایجاد تومور در جانوران مرتبط است (Ibelings and Chorus, 2007). قرار گرفتن در معرض ندولارین می‌تواند زمانی اتفاق بیفتد که فردی آب آلوده را مصرف کند، از طریق پوست خود با آن تماس پیدا کند، یا در قطرات آبی که در هوا آئروسل شده و حاوی سم هستند، تنفس کند. بر طبق دستورالعمل سازمان جهانی بهداشت (WHO)، مقدار مجاز ندولارین در آب آشامیدنی ۰/۲ میکروگرم در لیتر است (Dietrich and Hoeger, 2005; Ibelings and Chorus, 2007).

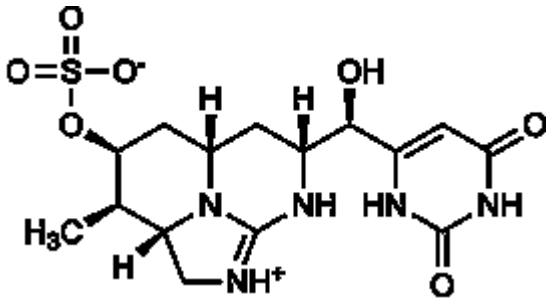


شکل ۴- ساختار شیمیایی ندولارین (Sandonato et al. 2016)

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

۳-سیلندراسپرموپسین (cylindrospermopsin)

سیانوباکتری *Cylindrospermopsis raciborskii* که در حال حاضر با نام‌های *Aphanizomenon ovalisporum* و *Raphidiopsis raciborskii* نیز شناخته می‌شود، سمی به نام سیلندراسپرموپسین تولید می‌کند. این سم یک آلکالوئید سه حلقه‌ای است (شکل ۵) که می‌تواند برای انسان و جانوران در مراحل حاد و مزمن، خطرناک باشد (Antunes et al. 2015). سموم قوی کبد، مانند سیلندراسپرموپسین، می‌توانند باعث سیروز و نکروز کبد در انسان و جانوران آزمایشگاهی شوند. در موارد شدید، سیلندراسپرموپسین می‌تواند به کلیه‌ها نیز آسیب برساند و منجر به نارسایی کلیه شود. همچنین، پژوهش‌ها نشان داده که سیلندراسپرموپسین باعث استرس اکسیداتیو و آسیب DNA در سلول‌ها می‌شود (Niture et al. 2023). به‌طور کلی، تماس کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز پرورش آبزیان با سم سیلندراسپرموپسین می‌تواند هنگامی رخ دهد که فردی آب آلوده را مصرف کند، از طریق پوست خود با آن تماس پیدا کند، یا در قطرات آبی که در هوا آئروسل شده و حاوی این سم هستند، تنفس کند. سازمان جهانی بهداشت (WHO) آستانه اولیه توصیه شده برای سیلندراسپرموپسین در آب آشامیدنی را ۱ میکروگرم در لیتر تعیین کرده است (Farrer et al. 2015).



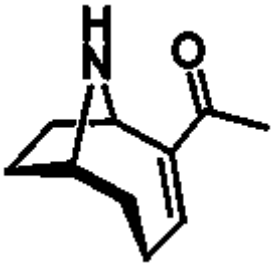
شکل ۵- ساختار شیمیایی سیلندراسپرموپسین (Kleinteic et al. 2014)

۴-آناتوکسین-A (anatoxin-a)

گونه‌های جلبکی *Anabaena* spp.، *Cylindrospermum* spp. و *Aphanizomenon* spp. در واقع سیانوباکتری‌هایی هستند که نوروتوکسین (سم فلج‌کننده عصبی) قدرتمندی تحت عنوان آناتوکسین-A تولید می‌کنند (Kellmann et al. 2013). این سم یک نوع آلکالوئید آمین دو حلقه‌ای ثانویه (شکل ۶) با سمیت عصبی حاد است که به‌عنوان عامل سریع مرگ شناخته می‌شود (Carmichael et al. 1979). آناتوکسین-A در ابتدا، در اوایل دهه ۱۹۶۰، در کانادا یافت شد و در سال ۱۹۷۲ معرفی شد.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

آناتوکسین-A یک آگونیست قوی برای گیرنده‌های نیکوتینی استیل کولین به‌شمار می‌رود که به‌طور برگشت‌ناپذیری به این گیرنده‌ها در سیستم عصبی مرکزی و محیطی متصل می‌شود. در نتیجه این امر، تحریک بیش از حد گیرنده‌ها و آزاد شدن انتقال‌دهنده عصبی استیل کولین باعث انقباضات عضلانی می‌شود. در غلظت‌های بالا، آناتوکسین-A می‌تواند باعث نارسایی تنفسی و مرگ شود (Environmental Protection Agency. 2015). مصرف آب آلوده، تماس با پوست یا استنشاق قطرات آب که در هوا آئروسل شده‌اند، همگی می‌توانند منجر به تماس کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز پرورش آبزیان با سم آناتوکسین-A شوند. مرگ و میر جانوران و بیماری‌های ناشی از رشد سیانوباکتری‌ها اغلب به آناتوکسین-A نسبت داده می‌شود. بر طبق دستورالعمل سازمان جهانی بهداشت (WHO)، مقدار مجاز آناتوکسین-A در آب آشامیدنی ۰/۲ میکروگرم در لیتر تعیین شده است (WHO, 2011).



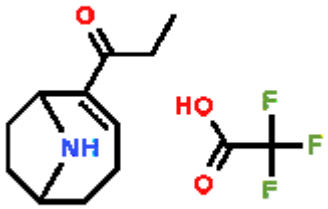
شکل ۶- ساختار شیمیایی آناتوکسین-A (Sanchez et al. 2014)

۵- هوموآناتوکسین (homoanatoxin)

سیانوباکتری‌های *Anabaena lemmermannii* و *Anabaena circinalis* گونه‌هایی هستند که سمی به‌نام هوموآناتوکسین تولید می‌کنند. این سم یک آلکالوئید حلقوی (شکل ۷) و عضوی از زیردسته سموم آناتوکسین است. هوموآناتوکسین یک نوروتوکسین قوی است که به‌عنوان یک آگونیست کولینرژیک (cholinergic agonist) بسیار شبیه آناتوکسین-A عمل می‌کند. در سیستم عصبی مرکزی و محیطی، هوموآناتوکسین به گیرنده‌های نیکوتینی استیل کولین متصل می‌شود. این سم گیرنده‌ها را بیش از حد تحریک می‌کند و باعث آزاد شدن استیل کولین می‌شود. لازم به‌ذکر است که استیل کولین یک انتقال‌دهنده عصبی است که باعث انقباضات عضلانی می‌شود. پژوهشگران مختلف از جمله Carmichael (۱۹۹۴) و Wood و همکاران اظهار داشتند که هوموآناتوکسین در دوزهای بالا، می‌تواند باعث نارسایی تنفسی و

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

مرگ شود. بلع آب آلوده، تماس با پوست، یا استنشاق قطرات آب که در آئروسل شده‌اند، همگی می‌توانند منجر به تماس کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز پرورش آبزیان با سم هوموآناتوکسین شوند. موارد متعددی از مرگ‌ومیر جانوران و بیماری‌های انسانی مرتبط با رشد سیانوباکتری‌ها به سم هوموآناتوکسین نسبت داده شده است (Wood et al. 2012).

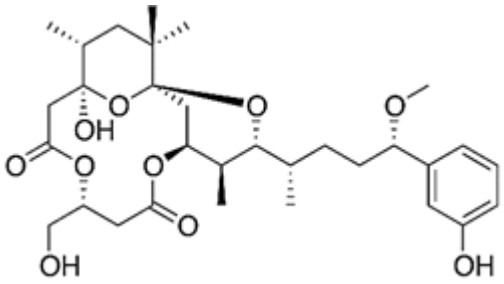


شکل ۷- ساختار شیمیایی هوموآناتوکسین (Cadel-Six et al. 2009)

۶- اُسیلاتوکسین A (oscillatoxin A)

چندین گونه از سیانوباکتری‌ها شامل *Phormidium* spp. و *Oscillatoria* spp.، سم معروفی به‌نام اُسیلاتوکسین A تولید می‌کنند. اُسیلاتوکسین A یک سم پپتیدی حلقوی است که شباهت‌های ساختاری با میکروسیستین‌ها دارد (شکل ۸) (Cadel-Six et al. 2007). پروتئین فسفاتاز-۱ (PP1) و پروتئین فسفاتاز ۲ A (PP2A) آنزیم‌های حیاتی هستند که در عملکردهای مختلف سلولی مانند تقسیم سلولی، متابولیسم و مرگ نقش دارند (Ramos et al. 2019). این آنزیم‌های مهم به‌شدت توسط سم اُسیلاتوکسین A مهار می‌شوند. آسیب سلولی، به ویژه در کبد و سیستم عصبی، می‌تواند ناشی از این مهار باشد (Kumar et al. 2022). از جمله روش‌هایی که منجر به تماس کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز پرورش آبزیان با سم اُسیلاتوکسین A می‌شود، می‌توان به نوشیدن آب آلوده و مصرف ماهی یا صدف‌هایی که این سم را در خود جای داده‌اند، اشاره کرد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که در برخی از موارد، مرگ جانوران و بیماری انسان، آسیب‌های کبدی و علائم عصبی، از جمله فلج، به سم اُسیلاتوکسین A نسبت داده شده است.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]



شکل ۸- ساختار شیمیایی اُسیلاتوکسین A (Nagai et al. 2019)

۷-سموم ناکینونز A-C (nakienones A-C)

سموم معروف به ناکینونز A-C توسط سیانوباکتری‌های خاصی مانند *Anabaena* و *Nostoc* ساخته می‌شوند. این سموم به‌عنوان لیپوپپتید شناخته می‌شوند و سیتوتوکسیک و ضدقارچ هستند. سمِ ناکینونِز C شامل سه پلی‌پپتید غیرحلقوی جداگانه است، در حالی‌که ناکینونِزهای A و B هپتاپپتیدهای حلقوی هستند.سموم ناشی از ناکینونِز A-C می‌توانند باعث آسیب به بدن مانند مشکلات گوارشی، بثورات پوستی، آسیب کبدی، ناباروری و حتی مرگ شوند. علاوه‌بر این، هر یک از این سموم می‌تواند کاربردهای پزشکی نیز داشته باشد. ناکینونِز A یک ضد التهاب و ضدقارچ است، در حالی‌که ناکینونِزهای B و C می‌توانند به‌طور بالقوه از تکثیر سلول‌های سرطانی جلوگیری کنند. Dabas و همکاران (۲۰۱۴) اظهار داشتند که ناکینونِز B اثرات ضدسرطانی از جمله ضدسرطان پروستات دارد. اگرچه سموم ناکینونِز به‌دلیل برخورداری از برخی ویژگی‌های خاص قابلیت استفاده در درمان‌های پزشکی را دارند، اما با این حال، در صورت مصرف یا استنشاق توسط انسان در غلظت‌های بالا می‌توانند کُشنده باشند.

۸-آفانتوکسین (aphantoxin)

آفانتوکسین سمی است که توسط برخی از گونه‌های سیانوباکتری از قبیل *Aphanizomenon* spp. و *Anabaena flosaquae* ساخته می‌شود (Liu et al. 2006). این سم یک نوروتوکسین و عضوی از خانواده سموم فلج‌کننده صدف (PSPs) است. آفانتوکسین‌ها با مسدود کردن انتقال‌دهنده‌های عصبی که آرامش و انقباض ماهیچه‌های انسان را تنظیم می‌کنند، تاثیر خود را بر جای می‌گذارند. این امر منجر به گرفتگی یا فلج عضلانی شدید همراه با انواع علائم سیستمیک مانند استفراغ یا تغییر حالات ذهنی می شود (Raposo et al. 2020).

به‌طور کلی، کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز آبزی‌پروری از طریق دو روش در معرض آفانتوکسین قرار می‌گیرند که شامل مصرف آب آلوده یا صدف‌هایی است که سموم در پیکره آن‌ها تجمع یافته‌اند (Asp et al. 2004). پژوهش‌های

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

مختلف نشان دادند که مرگ جانوران و بیماری‌های انسانی ناشی از رشد سیانوباکتری‌ها، در موارد متعددی به آفانتوکسین مرتبط است (Shaikh et al. 2022). بر اساس دستورالعمل سازمان جهانی بهداشت (WHO)، مقدار مجاز آفانتوکسین در آبزیان صدف‌دار، ۲۰ میکروگرم بر کیلوگرم تعیین شده است (Cires and Ballot. 2016).

۹- سموم آپلی‌سیاتوکسین (aplysiatoxin) و دیبرومو آپلی‌سیاتوکسین (debromoaplysiatoxin)

سموم آپلی‌سیاتوکسین و دیبرومو آپلی‌سیاتوکسین از جمله سموم شایعی هستند که در طی رشد سیانوباکتری‌ها، حیات آبزیان در اکوسیستم‌های آبی و همچنین زندگی انسان را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Nagai et al. 1996). سموم مذکور که چربی‌دوست هستند توسط سیانوباکتری‌های *Schizothrix*، *Lyngbya majuscule* و *L. sordida* ساخته می‌شوند (Zhang et al. 2020). سموم آپلی‌سیاتوکسین و دیبرومو آپلی‌سیاتوکسین بسیار خطرناک هستند، به‌طوری‌که می‌توانند اثرات نامطلوب وسیعی بر سلامتی انسان و جانوران مختلف داشته باشند. تماس کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز پرورش آبزیان با این سموم می‌تواند منجر به آسیب کبدی، سمیت عصبی و حتی مرگ شود (Puschner et al. 2017). علاوه‌بر این، سموم موردنظر دارای ویژگی‌های خاصی از جمله جهش‌زایی و سرطان‌زایی هستند که خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی را افزایش می‌دهند (Thawabteh et al. 2023). بر اساس گزارش‌های مختلف، این سموم می‌توانند از طریق تماس با آب آلوده در حین انجام فعالیت‌های تفریحی و مصرف مواد غذایی از جمله ماهیان پرورشی به بدن انسان انتقال یابند (Radkhah et al. 2022; Radkhah et al. 2023).

۱۰- سیتوفیسین‌و لینگبیاتوکسین (scytophycin/lyngbyatoxin)

سیتوفیسین‌ها و لینگبیاتوکسین دو گروه مهم از سموم چربی‌دوست هستند. گونه‌ی جلبکی *Scytonema hoffmannii* سیتوفیسین‌های A تا E را تولید می‌کند که برای گونه‌های آبزی مضر هستند (Thawabteh et al. 2023)؛ این در حالی است که گونه‌های جلبکی *Moorea producens* و *Lyngbya majuscule*، سم لینگبیاتوکسین A تا C را تولید می‌کنند (Jiang et al. 2014). سم لینگبیاتوکسین دارای اثرات سیتوتوکسیک و آپوپتوز روی سلول‌ها است و یک مهارکننده قوی سنتز پروتئین است (Gsottberger et al. 2023). قرار گرفتن در معرض سموم سیتوفیسین و لینگبیاتوکسین می‌تواند اثرات منفی مختلفی بر سلامت انسان و جانوران داشته باشد. پژوهش‌ها نشان داده است که سموم مذکور با تحریک

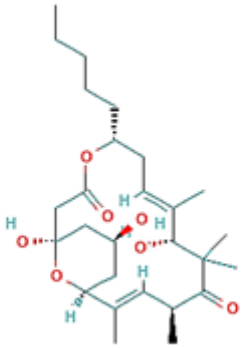
[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

پوست، مشکلات تنفسی و آسیب کبدی مرتبط هستند (Knutsen et al. 2018) و لینگبیاتوکسین اثرات کلیدی در تحریک‌تومورها دارد، از این‌رو، این سم می‌تواند خطر ابتلا به سرطان را افزایش دهد (Zhao et al. 2021). بر طبق گزارش‌های به دست آمده، سیتوفیسین علاوه‌بر اثرات سیتوتوکسیک و آپوپتوز بر روی سلول‌ها، اثرات نوروتوکسیک بر روی جانوران نیز دارد (Gasanov et al. 2014).

۱۱- آکوتیفیسین (acutiphycin)

آکوتیفیسین یک دسته از سموم ایندول آلکالوئید است (شکل ۹) که توسط جنس‌های مختلفی از سیانوباکتری‌های از قبیل *Fischerella*، *Hapalosiphon* و *Westiellopsis* تولید می‌شود (Walton and Berry, 2016). گزارش‌ها و مستندات علمی مختلف نشان داده است که تماس کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز پرورش آبزیان با سم آکوتیفیسین می‌تواند اثرات نامطلوبی بر سلامت آن‌ها داشته است. تأثیر بر ریبوزوم‌ها و جلوگیری از تشکیل پیوندهای پپتیدی، این سم را به یک مهارکننده قوی در سنتز پروتئین تبدیل کرده است (Alves and Policarpo. 2018).

بر طبق مطالعه Rizwan و همکاران (۲۰۱۸)، جانوران نیز در معرض سمیت کبدی و سمیت عصبی ناشی از سم آکوتیفیسین قرار می‌گیرند. مصرف مواد غذایی آلوده مانند صدف و ماهی و همچنین، نوشیدن آب آلوده می‌تواند منجر به تماس کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز پرورش آبزیان با سم آکوتیفیسین شود. علاوه‌بر این، امکان ورود این سم به بدن انسان از طریق انجام فعالیت‌های تفریحی در آب‌های آلوده و همچنین، استنشاق سموم پخش‌شده در هوای محیط وجود دارد (Ahmed. 1991).



شکل ۹- ساختار شیمیایی آکوتیفیسین (NCBI. 2024)

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

سلامت کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز آبزی‌پروری

مواجهه انسان با سیانوتوکسین‌ها می‌تواند به روش‌های مختلف صورت گیرد، با این حال، مسیر دهانی مهم‌ترین است. انتقال از این مسیر به‌طور عمده از طریق نوشیدن آب یا مصرف غذاهای آلوده امکان‌پذیر است (Radkhah and Eagderi, 2022a). علاوه‌بر این، قرار گرفتن در معرض پوست و استنشاق نیز انتقال مواد سمی به بدن انسان را ممکن می‌سازد (Funari and Testai. 2008). رشد سیانوباکتری‌ها می‌تواند به‌طور دوره ای در محیط‌های آبی رخ دهد. افراد به‌طور مزمن در معرض سیانوتوکسین‌ها با دوزهای نسبتاً کم قرار می‌گیرند. سموم شناخته شده از قبیل میکروسیستین‌ها، ندولارین‌ها و سیلندراسپرموپسین‌ها می‌توانند باعث آسیب کبد و کلیه، سمیت سلولی، سمیت عصبی، مسمومیت پوستی، اختلالات گوارشی و سایر مشکلات شوند (Lad et al. 2022; Li et al. 2023; Melaram et al. 2024). این اثرات می‌تواند در عرض چند دقیقه پس از قرار گرفتن در معرض سموم یا چند روز بعد ظاهر شوند (Costa et al. 2012; Zanchett and Oliveira-Filho, 2013). با توجه به این یافته‌ها، بسیاری از کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز آبزی‌پروری که به نحوی با پدیده‌های مهم مانند رشد سیانوباکتری‌ها در ارتباط هستند، به‌شدت در معرض بسیاری از پیامدهای سلامتی قرار دارند (Radkhah and Eagderi, 2022a). این مسئله نشان می‌دهد که راهکارهای ضروری به‌منظور آموزش کارکنان و افراد محلی باید در اولویت قرار گیرد تا این قشر متحمل خسارات جبران‌ناپذیر نشوند. در جدول ۱ فهرستی از پیامدهای ناشی از مواجهه کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز آبزی‌پروری با سموم حاصل از رشد سیانوباکتری‌ها ارائه شده است. در این جدول، مکان یا منبع وقوع رشد سیانوباکتری‌ها، سال آن به همراه نوع سم کشف شده و همچنین، اثرات ناشی از رشد سیانوباکتری‌ها روی سلامت کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز پرورش آبزیان ذکر شده است. اطلاعات ارائه شده نشان می‌دهد که نوع مواجهه افراد با سموم سیانوباکتری‌ها به‌واسطه مصرف آب آشامیدنی آلوده و تماس با آب آلوده در حین انجام فعالیت‌های تفریحی بوده است. بر طبق پژوهش‌ها و گزارش‌های اعلام‌شده، آلودگی با سم میکروسیستین بیشترین میزان گزارش را در طی رشد سیانوباکتری‌ها در کشورها و نقاط مختلف جهان داشته است. اثرات این سم اغلب در قالب مشکلات گوارشی (مانند گاستروانتریت، درد شکم، استفراغ و غیره)، آسیب‌های کبدی و عصبی و همچنین، ایجاد سرطان بروز یافته است.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

جدول ۱- پیامدهای ناشی از مواجهه کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز آبزی‌پروری با سموم حاصل از رشد سیانوباکتری‌ها (Bláha et al. 2009; Nowruzi et al. 2019; Schaefer et al. 2020; Bittner et al. 2021; Lad et al. 2022; Li et al. 2023; Melaram et al. 2024)

سال	منطقه (منبع)	سیانوباکتری‌ها	نوع سم	پیامدهای سلامتی
مصرف آب آشامیدنی آلوده				
۱۹۳۱	ایالات متحده آمریکا، رودخانه اوهایو	*Microcystis*	ناشناخته	گاستروانتریت، درد شکم، استفراغ
۱۹۶۵-۱۹۶۰	زیمبابوه، هراره	*Microcystis*	ناشناخته	گاستروانتریت
۱۹۷۵	ایالات متحده آمریکا، پنسیلوانیا	*Schizotrix, Lyngbya, Phormidium*	ناشناخته	گاستروانتریت
۱۹۷۱	استرالیا، جزیره نخل	*Cylindrospermopsis*	سیلندراسپرموپسین	گاستروانتریت، آسیب کبد، کلیه و روده
۱۹۸۱	استرالیا، آرمیدال	*Microcystis*	میکروسیستین	آسیب کبدی
۱۹۹۶-۱۹۷۷	چین	*Microcystis*	میکروسیستین	سرطان روده بزرگ، مرگ
۱۹۹۶	سوئد، مالمو	*Planktothrix*	میکروسیستین	گاستروانتریت، تب، درد شکمی و عضلانی
۱۹۸۸	برزیل، سد ایتاپاریکا	*Microcystis, Anabaena*	ناشناخته	گاستروانتریت، اسهال، مرگ و میر
تماس با آب آلوده در حین انجام فعالیت‌های تفریحی				
۱۹۵۹	کانادا، ساسکاچوان	*Microcystis* sp., *Anabaena circinalis*	ناشناخته	سردرد، تهوع، درد عضلانی، استفراغ، اسهال
۱۹۸۱-۱۹۸۰	ایالات متحده آمریکا، پنسیلوانیا و نِوادا	*Aphanizomenon, Anabaena*	ناشناخته	سوزش چشم و گوش، علائمی شبیه آنفولانزا
۱۹۸۹	انگلستان، استافوردشایر	*Microcystis* sp.	میکروسیستین	گاستروانتریت، گلودرد، دهان تاول‌زده، استفراغ، درد شکم، تب، اسهال
۱۹۹۸-۱۹۹۶	استرالیا (سواحل جنوب شرقی)	*Lyngbya* sp.	ناشناخته	درماتیت تماسی، سوزش چشم و گوش، تحریک تنفسی
۱۹۹۵	استرالیا	*Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Nodularia* sp.	ناشناخته	گاستروانتریت، علائم شبیه آنفولانزا، دهان تاول‌زده، تب، سوزش چشم و گوش، استفراغ، اسهال
۲۰۰۳-۲۰۰۲	فنلاند	*Anabaena lemmermannii*	ساکسی‌توکسین	تب، سوزش چشم، درد شکم، بثورات
۱۹۹۶	انگلستان	*Planktothrix* sp.	میکروسیستین	بثورات، تب
۲۰۰۱	برزیل، ریودوژانیرو	*Anabaena* sp., *Microcystis*	میکروسیستین	اختلال بینایی، وزوز گوش، حالت تهوع، استفراغ، آسیب کبدی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

۱۹۷۴	ایالات متحده آمریکا، واشنگتن	*Microcystis* sp.	میکروسیستین	تب، درد عضلانی، لرز، استفراغ
۱۹۹۶	برزیل، کاروارو	*Microcystis* sp.	میکروسیستین	اختلال بینایی، وزوز گوش، حالت تهوع، استفراغ، آسیب کبدی، مرگ و میر
۲۰۱۹	ساحل دریاچه شورمست (استان مازندران، ایران).	*Anabaena* sp.	ندولارین، آناتوکسین-A	عامل مرگ ومیر جانوران بومی و امکان انتقال سم به‌واسطه زنجیره غذایی به انسان
۲۰۲۰	ایالات متحده آمریکا، ساکنان محلیِ سواحل فلوریدا	*Microcystis aeruginosa*	میکروسیستین	اختلال بینایی، حالت تهوع، استفراغ، آسیب کبدی
۲۰۲۱	دریاچه لِخنی (ایرلند) دریاچه لیپنو (جمهوری چک)	*Microcystis* sp., *Aphanizomenon gracile*	میکروسیستین	ژنوتوکسیک (سمیت ژنی)
۲۰۲۲	پنسیلوانیا، نِوادا، فلوریدا (ایالات متحده آمریکا)	*Microcystis* sp., *Anabaena* sp.	آناتوکسین، میکروسیستین	اثرات کوتاه‌مدت شامل حالت تهوع، استفراغ، اسهال و شکم درد است. البته، در موارد شدید، می‌تواند منجر به نارسایی و آسیب کبدی شود.
۲۰۲۳	دریاچه چائوهو (چین)	*Microcystis aeruginosa*	میکروسیستین	قرار گرفتن طولانی مدت انسان در معرض میکروسیستین می‌تواند منجر به سمیت شدید کبدی، سمیت حاد و مرگ شود. علاوه‌بر این، مطالعات سم‌شناسی روی کبد نشان می‌دهد که آلودگی میکروسیستین با ایجاد سرطان کبد، بیماری کبدِ چرب و فیبروز کبدی مرتبط است. میکروسیستین می‌تواند به‌عنوان یک عامل پیش‌سرطانی نیز عمل کند و منجر به ضایعات کبدی شود.
۲۰۲۴	دریای بالتیک، شمال اروپا، استرالیا و ایالات متحده	*Nodularia spumigena*, *Nodularia sphaerocarpa*	ندولارین	ندولارین به سمیت و فعالیت‌های تحریک کننده تومور در سلول‌های کبدی کمک می‌کند. قرار گرفتن در معرض ندولارین می‌تواند باعث علائم و نشانه‌های مختلفی از جمله واکنش‌های آلرژیک، بثورات پوستی، بیماری‌های گوارشی، حالت تهوع، آسیب کبدی و خونریزی شود.

راهکارهای ضروری برای کنترل و مدیریت سیانوباکتری‌ها

در حال حاضر، راهکارهای مختلفی برای مهار رشد سیانوباکتری‌ها و جلوگیری از تولید سموم توسط آن‌ها وجود دارد. در این بخش، برخی از مهم‌ترین و رایج‌ترین راهکارهای قابل اجرا برای مدیریت و کنترل جمعیت سیانوباکتری‌ها در پیکره‌های آبی ارائه می‌شود:

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

۱-کنترل زیستی

یکی از روش‌های معمول برای کنترل زیستی، معرفی یک باکتری طبیعی است که اثرات متضادی بر جمعیت سیانوباکتری‌ها داشته باشد. این اثرات می‌تواند از طریق رقابت برای منابع یا از طریق ایجاد مواد شیمیایی سمی برای سیانوباکتری‌ها اعمال شود. از جمله باکتری‌هایی که‌می‌توانند چنین اثرات متضادی بر جمعیت سیانوباکتری‌ها داشته باشند، می‌توان به *Bacillus* spp. و *Pseudomonas* spp. اشاره کرد (Shah et al. 2021). از طرف دیگر، سیانوفاژها به‌عنوان یک ویروس طبیعی که از سلول‌های سیانوباکتری تغذیه می‌کنند، می‌توانند جمعیت این گروه از جلبک‌ها را کاهش دهند (Kibuye et al. 2021). سایر راهکارهای کنترل زیستی شامل افزودن عصاره‌های گیاهی یا موجودات آبزی خاص به آب‌هایی است که قبلاً آلوده شده‌اند. چندین عصاره گیاهی، از جمله *Salvinia molesta* رشد سیانوباکتری‌ها را مهار می‌کنند. ماهیان گیاه‌خوار، از جمله کپور نقره‌ای (*Hypophthalmichthys molitrix*)، کپور سرگُنده (*H. nobilis*) و تیلاپیای نیل (*Oreochromis niloticus*) مصرف‌کنندگان مستقیم فیتوپلانکتون هستند (Rivera et al. 2018). موجودات آبزی مانند بی‌مهرگان فیلترکننده و دافنیای زئوپلانکتون که از سیانوباکتری‌ها تغذیه می‌کنند، می‌توانند به کاهش جمعیت این گروه از جلبک‌ها کمک کنند (Thawabteh et al. 2023).

کاهش منابع یک راهکار مدیریتی است که هدف آن کاهش ورودی‌های مواد مغذی است که از رشد سیانوباکتری‌ها حمایت می‌کند. این راهکار می‌تواند به کنترل رشد سیانوباکتری‌ها در سیستم‌های آبی کمک کند. کاهش مصرف کود (به‌طور عمده نیتروژن و فسفر) در مزارع کشاورزی اطراف و کاهش ورودی‌های فاضلاب نمونه‌هایی از راهکارهای مدیریت مواد مغذی هستند (Erratt et al. 2022). علاوه‌بر این، پوشش گیاهی نیز در کنترل تولیدمثل سیانوباکتری‌ها نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند، زیرا ورودی‌های مواد مغذی را کاهش می‌دهد و با ایجاد سایه، از میزان نور مورد نیاز برای رشد سیانوباکتری‌ها می‌کاهد. بازسازی یا ایجاد تالاب‌ها، کاشت نوارهای حائل و استفاده از تکنیک‌های مدیریت مناطق ساحلی از جمله گزینه‌های مطرح در رابطه با مدیریت پوشش گیاهی هستند (Leong et al. 2021). سیستم‌های تصفیه فاضلاب حاوی مواد مغذی مختلفی هستند که با ورود آن‌ها به درون پیکره‌های آبی، شرایط لازم برای رشد جلبک‌ها از جمله سیانوباکتری‌ها فراهم می‌شود. با مدیریت و نگهداری صحیح این سیستم‌ها، امکان ورود مواد مغذی به پیکره‌های آبی کاهش می‌یابد و روند گسترش سیانوباکتری‌ها در این مناطق مورد کنترل

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

قرار می‌گیرد (Schaider et al. 2016). علاوه‌بر این، تخریب خاک نیز مقدار ورود مواد مغذی به آب را افزایش می‌دهد که می‌تواند باعث رشد سیانوباکتری‌ها شود. کاهش فرسایش خاک و جلوگیری از ورود مواد مغذی می‌توانند به کنترل رشد سیانوباکتری‌ها کمک کنند (Leong et al. 2021).

۲-کنترل فیزیکی

با استفاده از روش‌های فیزیکی، می‌توان میزان رشدِ سیانوباکتری‌ها را کاهش داد یا از گسترش آن‌ها جلوگیری کرد. برای مثال، افزودن اکسیژن به آب (هوادهی) می‌تواند با تشویق رشد باکتری‌های مفیدی که برای مواد مغذی با سیانوباکتری‌ها رقابت می‌کنند، به اختلال در رشدِ سیانوباکتری‌ها کمک کند (Stroom and Kardinaal, 2016). انجام هوادهی می‌تواند میزان نور قابل دسترس برای رشد سیانوباکتری‌ها را کاهش دهد. یکی دیگر از روش‌های فیزیکی برای کنترل جمعیت سیانوباکتری‌ها، جمع‌آوری این جلبک‌ها از پیکره‌های آبی با استفاده از ابزاری مانند تور است (Visser et al. 2016). علاوه‌بر این، با استفاده از موانع فیزیکی نیز می‌توان از انتشار سیانوباکتری‌ها به سایر قسمت‌های آب جلوگیری کرد. ایجاد موانع فیزیکی در مناطقی مانند نزدیک به منبع ورودی نیتروژن که تراکم جمعیت سیانوباکتری‌ها افزایش می‌یابد، می‌تواند بسیار مفید باشد (Igwaran et al. 2024). گاهی اوقات می‌توان از کاهش آب برای کنترل رشد سیانوباکتری‌ها استفاده کرد. این راهکار می‌تواند در سیستم‌های آبی کوچک موثر واقع شود، اما در پیکره‌های بزرگ‌تر کارآمدی خاصی نداشته باشد (Sukenik and Kaplan, 2021).

۳- کنترل شیمیایی

مواد حساسیت‌زا، سولفات مس و پراُکسید هیدروژن از جمله ابزارهای شیمیایی هستند که می‌توان از آنها برای کنترل رشد سیانوباکتری‌ها استفاده کرد. با این حال، به‌دلیل خطرات بالقوه برای محیط‌زیست و سلامت عمومی، اقدامات شیمیایی اغلب به‌عنوان آخرین گزینه برای کنترل سیانوباکتری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kansole and Lin, 2017). سولفات مس به‌دلیل ویژگی‌های سمی خود، ارگانیسم‌های کوچکتری مانند سیانوباکتری‌ها را از بین می‌برد. با این حال، پراکسید هیدروژن اغلب به‌عنوان یک جایگزین غیرسمی برای موجودات بزرگتر یا در مناطقی با گونه‌های حساس استفاده می‌شود. علاوه‌بر این، سدیم کربنات پراکسی هیدرات می‌تواند برای محدود کردن رشد سیانوباکتری‌ها با از بین بردن توانایی آن‌ها در فتوسنتز مورد استفاده قرار گیرد (Xu et al. 2021). همه این ترکیبات در کاهش رشد سیانوباکتری‌ها و سمیت حاصل از آن‌ها موثر هستند. با این حال، ترکیبات مذکور فقط باید در

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

مواقع ضروری مورد استفاده قرار گیرند، چراکه در دراز مدت می‌توانند تأثیرات منفی بر محیط‌زیست بگذارند (Thawabteh et al. 2023).

سلول‌های سیانوباکتری و مقادیر کمی از سموم با استفاده از تکنیک‌های متعارف تصفیه آب مانند انعقاد، ته‌نشینی، فیلتراسیون و کُلرزنی با موفقیت حذف می‌شوند. در طول رشدِ بی‌رویه سیانوباکتری‌ها، راهکار حذف باید زمانی‌که مقادیر قابل توجهی از سلول‌های سیانوباکتری یا سیانوتوکسین‌های آن‌ها در آب وجود دارد، با دقت انتخاب شود زیرا برخی از سیانوتوکسین‌ها با این راهکار قابلیت حذف دارند، در حالی‌که امکان حذف برخی دیگر وجود ندارد (Thawabteh et al. 2023). برای انتخاب بهترین روش حذف، شناخت کامل از گونه‌های سیانوباکتری، الگوهای رشد آن‌ها و ویژگی‌های سیانوتوکسین‌ها امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. سیانوتوکسین‌هایی که درون سلولی و خارج سلولی (محلول) هستند را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های مختلف حذف کرد. تکنیک‌های متعددی برای حذف سیانوتوکسین‌های داخلی، از جمله انعقاد/رسوب، میکرو و اولترافیلتراسیون و اُکسیداسیون قبل از تصفیه استفاده شده است؛ این در حالی است که برخی از تکنیک‌های حذف سیانوتوکسین‌های خارج سلولی (محلول) شامل غشاء (نانو و اولترافیلتراسیون)، پرمنگنات پتاسیم، اُزن‌زنی، استفاده از کُلر آزاد، اشعه ماوراء بنفش و جذب فیزیکی با استفاده از کربن فعال است (Abbas et al. 2020). هر روش دارای مزایا و اثربخشی‌های خاصی است که به عوامل مختلفی از جمله متغیرهای شیمیایی، فیزیکی و زیستی بستگی دارند (Thawabteh et al. 2023).

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، خطرات ناشی از رشد سیانوباکتری‌ها یا جلبک‌های سبزآبی در اکوسیستم‌های آبی مورد بحث قرار گرفت. بر طبق یافته‌های ارائه شده، هنگامی‌که شرایط محیطی در وضعیت ایده‌آل قرار داشته باشد، سیانوباکتری‌ها می‌توانند به‌سرعت گسترش یابند. رشد تصاعدی این گروه از ریزجلبک‌ها می‌تواند به‌واسطه فراوانی بیش از حد مواد مغذی به‌ویژه نیتروژن و فسفر حاصل از پساب‌های کشاورزی، صنعتی و شهری افزایش یابد. با این حال، رشد و گسترش سریع سیانوباکتری‌ها می‌تواند منجر به تولید سمومی شود که هم برای انسان و هم برای جانوران آبزی بسیار خطرناک است. موید این نکته اطلاعات ارائه شده در این پژوهش است که بیان می‌دارد گونه‌های متعددی از سیانوباکتری‌ها می‌توانند سموم مختلفی مانند میکروسیستین‌ها، ندولارین، آناتوکسین-A و سیلندراسپرموپسین تولید کنند که به کبد و سیستم عصبی آسیب می‌رساند. عوامل

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

مختلفی از قبیل فراوانی بیش از حد مواد مغذی، دمای بالا، نور زیاد خورشید و جریان آهسته آب موجب رشد سیانوباکتری‌ها می‌شوند. علاوه‌بر این، ایجاد تاسیسات لازم برای تصفیه فاضلاب و تلاش‌های صنعتی و کشاورزی، مواد مغذی موردنیاز برای رشد سیانوباکتری‌ها را فراهم می‌کنند. مجموعه این موارد نقش قابل توجهی در افزایش تولید سموم در پیکره‌های آبی دارند که به نوبه خود تاثیرات نامطلوبی روی سلامت آبزیان و انسان می‌توانند داشته باشد. با توجه به این موضوع، لزوم به‌کارگیری تکنیک‌های مختلف به منظور کنترل و کاهش اثرات ناشی از سیانوباکتری‌ها امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. کارشناسان و سیاست‌گذاران محیط‌زیست بر این باور هستند که پایش مداوم و مستمر سیانوباکتری‌ها در سیستم‌های آبی به‌منظور مدیریت خطرات احتمالی، بهترین راه‌حل به‌شمار می‌رود که نیاز به تشخیص زودهنگام و اقدام سریع دارد. لزوم اتخاذ تصمیمات و راهکارهای مدیریتی در رابطه با کارکنان دریایی و افراد شاغل در مراکز آبزی‌پروری نیز امری ضروری است، چراکه این مسئله می‌تواند سلامت بسیاری از کارکنان و افراد شاغل در مراکز شیلات، محیط زیست و سایر نهادهای وابسته را که به نحوی با رشد سیانوباکتری‌ها در محیط‌های دریایی در ارتباط هستند، تحت تاثیر قرار دهد.

فهرست منابع

References

Abbas T, Kajjumba GW, Ejjada M, Masrura SU, Marti EJ, Khan E, Jones-Lepp TL. 2020. Recent advancements in the removal of cyanotoxins from water using conventional and modified adsorbents- A contemporary review. Water. 12(10):2756. DOI: 10.3390/w12102756

Ahmed FE. 1991. Institute of medicine (US) committee on evaluation of the safety of fishery products; Ahmed FE, editor. Seafood Safety. Washington (DC): National Academies Press (US); 1991. Naturally Occurring Fish and Shellfish Poisons. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov. Accessed on 27 May 2018.

Alves RRN and Policarpo IDS. 2018. Animals and human health: Where do they meet? Ethnozoology. 2018:233-259. DOI: 10.1016/B978-0-12-809913-1.00013-2

Antunes JT, Leão PN, Vasconcelos VM. 2015. *Cylindrospermopsis raciborskii*: review of the distribution, phylogeography, and ecophysiology of a global invasive species. Front Microbiol. 6:473.

Arman T and Clarke JD. 2021. Microcystin toxicokinetics, molecular toxicology, and pathophysiology in preclinical rodent models and humans. Toxins. 13(8):537. DOI: 10.3390/toxins13080537

Asp TN, Larsen S, Aune T. 2004. Analysis of PSP toxins in Norwegian mussels by a post-column derivatization HPLC method. Toxicon. 43(3):319-327. DOI: 10.1016/j.toxicon.2004.01.004

Baker A.L. 2012. Phycokey - an image based key to Algae (PS Protista), Cyanobacteria, and other aquatic objects. University of New Hampshire Center for Freshwater Biology. Available from: http://cfb.unh.edu/phycokey/phycokey.htm. Accessed on 28 November 2024.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

Bittner M, Štern A, Smutná M, Hilscherová K, Žegura B. 2021. Cytotoxic and Genotoxic Effects of Cyanobacterial and Algal Extracts-Microcystin and Retinoic Acid Content. Toxins (Basel). 13(2):107.
Bláha L, Babica P, Maršálek B. 2009. Toxins produced in cyanobacterial water blooms - toxicity and risks. Interdiscip Toxicol. 2(2):36-41. DOI: 10.2478/v10102-009-0006-2
Bonilla S, Aguilera A, Aubriot L, Huszar V, Almanza V, Antoniades D. 2023. Nutrients and not temperature are the key drivers for cyanobacterial biomass in the Americas. Harmful Algae. 121:102367.
Brezeștean IA, Gherman AMR, Colniță A, Dina NE, Müller Molnár C, Marconi D, Chiș V, David I-L, Cîntă-Pînzaru S. 2022. Detection and Characterization of Nodularin by Using Label-Free Surface-Enhanced Spectroscopic Techniques. International Journal of Molecular Sciences. 23(24):15741.
Cadel-Six S, Peyraud-Thomas C, Brient L, de Marsac NT, Rippka R, Méjean A. 2007. Different genotypes of anatoxin-producing cyanobacteria coexist in the Tarn River, France. Appl Environ Microbiol. 73(23):7605-7614. DOI: 10.1128/AEM.01225-07
Cadel-Six S, Iteman I, Peyraud-Thomas C, Mann S, Ploux O, Méjean A. 2009. Identification of a polyketide synthase coding sequence specific for anatoxin-a-producing Oscillatoria cyanobacteria. Applied and Environmental Microbiology. 75(14):4909-4912. DOI: 10.1128/AEM.02478-08
Carmichael WW. 1994. The toxins of cyanobacteria. Sci. Am. 270: 78-86 .
Carmichael WW, Biggs DF, Peterson MA. 1979. Pharmacology of anatoxin-a, produced by the freshwater cyanophyte Anabaena flos-aquae NRC-44-1. Toxicon. 17:229-236.
Cires S and Ballot A. 2016. A review of the phylogeny, ecology and toxin production of bloom-forming Aphanizomenon spp. and related species within the Nostocales (*Cyanobacteria*) Harmful Algae. 54:21-43. DOI: 10.1016/j.hal.2015.09.007
Costa M, Costa-Rodrigues J, Fernandes MH, Barros P, Vasconcelos V, Martins R. 2012. Marine cyanobacteria compounds with anticancer properties: A review on the implication of apoptosis. Mar. Drug. 10:2181-2207. DOI: 10.3390/md10102181
Dabas P, Tripathi S, Chauhan S, Malik I, Kumar N, Kumari S, Kumari R, Bhatnagar S. 2014. *Cyanobacteria*—An unexplored source for biomolecules: A Review. Adv. Sci. Eng. Med. 6:921-930. DOI: 10.1166/asem.2014.1581
Demoulin CF, Lara YJ, Cornet L, François C, Baurain D, Wilmotte A, Javaux EJ. 2019. Cyanobacteria evolution: Insight from the fossil record. Free Radic Biol Med. 140:206-223.
Dietrich D and Hoeger S. 2005. Guidance values for microcystins in water and cyanobacterial supplement products (blue-green algal supplements): A reasonable or misguided approach? Toxicol. Appl. Pharmacol. 203: 273-289.
Environmental Protection Agency. 2014. *Cyanobacteria* and cyanotoxins: Information for drinking water systems. 11 p. Available from: http://water.epa.gov/scitech/drinkingwater/dws/ccl. Accessed on 23 May 2023.
Environmental Protection Agency. 2015. Health effects support document for the cyanobacterial toxin anatoxin-A. U.S. environmental protection agency office of water (4304T); Health and Ecological Criteria Division Washington, DC 20460. Washington, USA. 58 p.
Erratt KJ, Creed IF, Trick CG. 2022. Harmonizing science and management options to reduce risks of cyanobacteria. Harmful Algae. 116:102264. DOI: 10.1016/j.hal.2022.102264
Falconer IR. 2005. Cyanobacterial toxins of drinking water supplies; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, pp. 45-68.
Farrer D, Counter M, Hillwig R, Cude C. 2015. Health-based cyanotoxin guideline values allow for cyanotoxin-based monitoring and efficient public health response to cyanobacterial blooms. Toxins (Basel). 7(2):457-477. DOI: 10.3390/toxins7020457
Falfushynska H, Kasianchuk N, Siemens E, Henao E, Rzymski P. 2023. A Review of common cyanotoxins and their effects on fish. Toxics. 11(2): 118. DOI: 10.3390/toxics11020118
Funari E and Testai E. 2008. Human health risk assessment related to cyanotoxins exposure. Crit. Rev. Toxicol. 38:97-125. DOI: 10.1080/10408440701749454
Harmful Algal Blooms. 2023. Harmful *Cyanobacteria*. https://hab.whoi.edu/impacts/impacts-freshwater. Accessed on 23 May 2023.
Gasanov SE, Dagda RK, Rael ED. 2014. Snake venom cytotoxins, phospholipase A_2s, and Zn^{2+}-dependent metalloproteinases: Mechanisms of action and pharmacological relevance. J Clin Toxicol. 4(1): 1000181. DOI: 10.4172/2161-0495.1000181
Gsottberger F, Meier C, Ammon A, Parker S, Wendland K, George R, Petkovic S, Mellenthin L, Emmerich C, Lutzny-Geier G, Metzler M, Mackensen A, Chandramohan V, Müller F. 2023.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

Targeted inhibition of protein synthesis renders cancer cells vulnerable to apoptosis by unfolded protein response. Cell Death Dis. 14(8):561. DOI: 10.1038/s41419-023-06055-w

Harmful Algal Blooms. 2023. Harmful *Cyanobacteria*. Available from: https://hab.whoi.edu/impacts/impacts-freshwater. Accessed on 23 May 2023.

Harvey BJ, Nash KL, Blanchard JL, Edwards DP. 2018. Ecosystem-based management of coral reefs under climate change. Ecol Evol. 8(12):6354-6368. DOI: 10.1002/ece3.4146

Ibelings BW and Chorus I. 2007. Accumulation of cyanobacterial toxins in freshwater "seafood" and its consequences for public health: A review. Environ. Pollut. 150: 177-192.

Igwaran A, Kayode AJ, Moloantoa KM. 2024. Cyanobacteria harmful algae blooms: Causes, impacts, and risk management. Water Air Soil Pollut. 235: 71 (2024).

iNaturalist CF. 2024. A Community for Naturalists - iNaturalist. Available from: https://www.inaturalist.org. Accessed on 29 November 2024.

Janik E, Ceremuga M, Saluk-Bijak J, Bijak M. 2019. Biological toxins as the potential tools for bioterrorism. Int J Mol Sci. 20(5):1181. DOI: 10.3390/ijms20051181

Jiang W, Zhou W, Uchida H, Kikumori M, Irie K, Watanabe R, Suzuki T, Sakamoto B, Kamio M, Nagai H. 2014. A new lyngbyatoxin from the Hawaiian *Cyanobacterium Moorea* producens. Mar Drugs. 12(5): 2748-2759. DOI: 10.3390/md12052748

Kansole MMR and Lin TF. 2017. Impacts of hydrogen peroxide and copper sulfate on the control of *Microcystis aeruginosa* and MC-LR and the inhibition of MC-LR degrading bacterium *Bacillus* sp. Water. 9(4): 255. DOI: 10.3390/w9040255

Kellmann R, Ploux O, Neilan BA. 2013. Neurotoxic alkaloids from *Cyanobacteria*. In: Ramawat, K., Mérillon, JM. (Eds) Natural Products. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-22144-6_47

Khalifa SAM, Shedid ES, Saied EM, Jassbi AR, Jamebozorgi FH, Rateb ME, Du M, Abdel-Daim MM, Kai GY, Al-Hammady MAM, Xiao J, Guo Z, El-Seedi HR. 2021. Cyanobacteria-from the oceans to the potential biotechnological and biomedical applications. Mar Drugs. 19(5):241.

Kibuye FA, Zamyadi A, Wert EC. 2021. A critical review on operation and performance of source water control strategies for cyanobacterial blooms: Part II-mechanical and biological control methods. Harmful Algae. 109:102119. DOI: 10.1016/j.hal.2021.102119

Kleinteic J, Hildebrand F, Wood SA, Dietrich DR. 2014. Diversity of toxin and non-toxin containing cyanobacterial mats of meltwater ponds on the Antarctic Peninsula: A pyrosequencing approach. Antarctic Science. 26(5):1-12. DOI: 10.1017/S0954102014000145

Knutsen HK, Alexander J, Barregård L, Hoogenboom LR. 2018. Risk for animal and human health related to the presence of dioxins and dioxin-like PCBs in feed and food. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). 16(11):e05333. DOI: 10.2903/j.efsa.2018.5333

Kumar S, Singla B, Singh AK, Thomas-Gooch SM, Zhi K, Singh UP. 2022. Hepatic, extrahepatic and extracellular vesicle cytochrome P450 2E1 in alcohol and acetaminophen-mediated adverse interactions and potential treatment options. Cells. 11(17):2620. DOI: 10.3390/cells11172620

Lad A, Breidenbach JD, Su RC, Murray J, Kuang R, Mascarenhas A, Najjar J, Patel S, Hegde P, Youssef M, Breuler J, Kleinhenz AL, Ault AP, Westrick JA, Modyanov NN, Kennedy DJ, Haller ST. 2022. As we drink and breathe: adverse health effects of microcystins and other harmful algal bloom toxins in the liver, gut, lungs and beyond. Life. 12(3): 2022. DOI: 10.3390/life12030418

Leong YK, Huang CY, Chang JS. 2021. Pollution prevention and waste phycoremediation by algal-based wastewater treatment technologies: The applications of high-rate algal ponds (HRAPs) and algal turf scrubber (ATS) J. Environ. Manag. 296:113193. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113193

Li T, Fan X, Cai M, Jiang Y, Wang Y, He P, Ni J, Mo A, Peng C, Liu J. 2023. Advances in investigating microcystin-induced liver toxicity and underlying mechanisms. Science of The Total Environment. 905:167167. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167167

Liu Y, Chen W, Li D, Shen Y, Li G, Liu Y. 2006. First report of aphantoxins in China—Waterblooms of toxigenic *Aphanizomenon flosaquae* in Lake Dianchi. Ecotoxicol. Environ. Saf. 65:84-92.

Melaram R, Newton AR, Lee A. 2024. A review of microcystin and nodularin toxins derived from freshwater cyanobacterial harmful algal blooms and their impact on human health. Toxicology and Environmental Health Sciences. 16: 233-241. DOI: 10.1007/s13530-024-00220-0

Metcalf JS, Tischbein M, Cox PA, Stommel EW. 2021. Cyanotoxins and the nervous system. Toxins (Basel). 13(9): 660. DOI: 10.3390/toxins13090660

Mulvenna V, Dale K, Priestly B, Mueller U, Humpage A, Shaw G, Allinson G, Falconer I. 2012. Health risk assessment for *Cyanobacterial* toxins in seafood. International Journal of Environmental Research and Public Health. 9(3): 807-820. DOI: 10.3390/ijerph9030807

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

Mutalipassi M, Riccio G, Mazzella V, Galasso C, Somma E, Chiarore A, de Pascale D, Zupo V. 2021. Symbioses of *Cyanobacteria* in marine environments: Ecological insights and biotechnological perspectives. Marine Drugs. 19(4):227. DOI: 10.3390/md19040227

Nagai H, Yasumoto T, Hokama Y. 1996. Aplysiatoxin and debromoaplysiatoxin as the causative agents of a red alga *Gracilaria coronopifolia* poisoning in Hawaii. Toxicon. 34(7):753-61.

Nagai H, Sato S, Iida K, Hayashi K, Kawaguchi M, Uchida H, Satake M. 2019. Oscillatoxin I: A New Aplysiatoxin Derivative, from a Marine Cyanobacterium. Toxins (Basel). 11(6):366.

NCBI. 2024. National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Summary for CID 10939765, (+)-Acutiphycin. Available from: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Acutiphycin. Accessed on 27 November 2024.

Niture S, Gadi S, Qi Q, Rios-Colon L, Khatiwada S, Vandana, Fernando RA, Levine KE, Kumar D. 2023. Cyanotoxins increase cytotoxicity and promote nonalcoholic fatty liver disease progression by enhancing cell steatosis. Toxins (Basel). 15(7): 411. DOI: 10.3390/toxins15070411

Nowruzi B, Blanco S, Nejadsattari T. 2019. Chemical and molecular evidences for the poisoning of a duck by anatoxin-a, nodularin and cryptophycin at the coast of lake Shoormast (Mazandaran province, Iran). International Journal on Algae. 20: 359-376.

Oksanen I, Jokela J, Fewer DP, Wahlsten M, Rikkinen J, Sivonen K. 2004. Discovery of rare and highly toxic microcystins from lichen-associated cyanobacterium Nostoc sp. strain IO-102-I. Appl Environ Microbiol. 70(10): 5756-5763. DOI: 10.1128/AEM.70.10.5756-5763.2004

Ozawa K, Yokoyama A, Ishikawa K. 2003. Accumulation and depuration of microcystin produced by the cyanobacterium *Microcystis* in a freshwater snail. Limnology. 4: 131-138.

Paerl HW and Huisman J. 2009. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. Environ Microbiol Rep. 1(1): 27-37. DOI: 10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x

Puschner B, Bautista AC, Wong C. 2017. Debromoaplysiatoxin as the Causative Agent of Dermatitis in a Dog after Exposure to Freshwater in California. Front Vet Sci. 4:50. DOI: 10.3389/fvets.2017.00050

Radkhah AR and Eagderi S. 2019. Investigation of biological characteristics and breeding potentials of some species of surgeonfish (Family: Acanthuridae) inhabiting the Persian Gulf for exploitation in the ornamental fish breeding industry. Journal of Ornamental Aquatics. 6(4): 1-11.

Radkhah AR and Eagderi S. 2020. Book Review: Fish Protection Technologies and Fish Ways for Downstream MigrationU.Schwevers & B.Adam, Springer, Switzerland, 2020. ISBN: 9783030192426." Fish and Disheries. 2020: 1-2. DOI: 101111/faf.12492

Radkhah AR and Eagderi S. 2022a. Biosecurity in aquaculture systems as one of the requirements for sustainable development. Journal of Biosafety. 15(2): 97-118.

Radkhah AR and Eagderi S. 2022b. Prevalence of fish lice, *Argulus* (Crustacea: Branchiura) in freshwater and two ornamental fishes of Iran. Journal of Fisheries 10(3):103301. DOI:10.17017/j.fish.383

Radkhah AR, Eagderi S, Sadeghinejad Masouleh E. 2022. Accumulation of heavy metals in fish: A serious threat to food security and public health. Journal of Marine Medicine. 3(4): 236-245.

Radkhah AR, Eagderi S, Poorbagher H. 2023. Investigating Some Common bacterial pathogens between humans and aquatic organisms: Maintaining the biosecurity of workers in aquaculture centers: A Review. Journal of Biosafety. 16(1): 73-92.

Ramage J and Pillai S. 2015. The Public health response to potential bioterrorism by toxin attack. In: Gopalakrishnakone, P., Balali-Mood, M., Llewellyn, L., Singh, B.R. (Eds) Biological Toxins and Bioterrorism. Toxinology. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-007-5869-8_24

Ramos F, Villoria MT, Alonso-Rodríguez E, Clemente-Blanco A. 2019. Role of protein phosphatases PP1, PP2A, PP4 and Cdc14 in the DNA damage response. Cell Stress. 3(3):70-85.

Raposo MIC, Gomes MTSR, Botelho MJ, Rudnitskaya A. 2020. Paralytic shellfish toxins (PST)-transforming enzymes: A review. Toxins (Basel). 12(5):344. DOI: 10.3390/toxins12050344

Rastogi RP, Madamwar D, Incharoensakdi A. 2015. Bloom dynamics of cyanobacteria and their toxins: environmental health impacts and mitigation strategies. Front Microbiol. 6:1254.

Rathish B, Pillay R, Wilson A. 2023. Comprehensive review of bioterrorism. [Updated 2023 Mar 27]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan-. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK570614. Accessed on 23 August 2023.

Rivera F, Menezes RF, Attayde JL. 2018. Effects of the *Nile tilapia* (*Oreochromis niloticus* L.) on the plankton community of a tropical reservoir during and after an algal bloom. Hydrobiologia. 817: 393-401. DOI: 10.1007/s10750-018-3591-2

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

Rizwan M, Mujtaba G, Memon SA, Lee K, Rashid N. 2018. Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 92: 394-404.
Sanchez JA, Otero P, Alfonso A, Ramos V, Vasconcelos V, Aráoz R, Molgó J, Vieytes MR, Botana LM. 2014. Detection of anatoxin-a and three analogs in Anabaena spp. cultures: new fluorescence polarization assay and toxin profile by LC-MS/MS. Toxins (Basel). 6(2):402-415.
Sandonato BB, Santos VG, Luizete MF, Bronzel JL, Eberlin MN, Milagre HMS. 2016. MALDI Imaging Mass Spectrometry of Fresh Water Cyanobacteria: Spatial Distribution of Toxins and Other Metabolites. Journal of the Brazilian Chemical Society. 28(4):1-15. DOI: 10.5935/0103-5053.20160191
Sangolkar LN, Maske SS, Chakrabarti T. 2006. Methods for determining microcystins (peptide hepatotoxins) and microcystin-producing cyanobacteria. Water Res. 40(19): 3485-3496.
Schaefer AM, Yrastorza L, Stockley N, Harvey K, Harris N, Grady R, Sullivan J, McFarland M, Reif JS. 2020. Exposure to microcystin among coastal residents during a cyanobacteria bloom in Florida. Harmful Algae. 92:101769. DOI: 10.1016/j.hal.2020.101769
Schaider LA, Ackerman JM, Rudel RA. 2016. Septic systems as sources of organic wastewater compounds in domestic drinking water wells in a shallow sand and gravel aquifer. Sci Total Environ. 547:470-481. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.081
Shah ST, Basit A, Ullah I, Mohamed HI. 2021. Plant growth-promoting microbes for sustainable biotic and abiotic stress management. Springer; Cham, Switzerland: 2021. *Cyanobacteria* and algae as biocontrol agents against fungal and bacterial plant pathogens. pp. 1-23.
Shaikh R, Rizvi A, Pandit S, Desai N, Patil R. 2022. An integration of phycoremediation processes in wastewater treatment. Elsevier; Amsterdam, Netherlands: 2022. Microalgae: Classification, bioactives, medicinal properties, industrial applications, and future prospectives; pp. 451-486.
Sivonen K and Jones G. 1999. Cyanobacterial toxins. Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management eds Chorus I., Bartram J. (London: E and FN Spon;). pp. 41-111.
Stroom JM and Kardinaal WEA. 2016. How to combat cyanobacterial blooms: strategy toward preventive lake restoration and reactive control measures. *Aquat Ecol.* 50: 541-576.
Sukenik A and Kaplan A. 2021. Cyanobacterial harmful algal blooms in aquatic ecosystems: A Comprehensive outlook on current and emerging mitigation and control approaches. Microorganisms. 9(7): 1472. DOI: 10.3390/microorganisms9071472
Taton A, Grubisic S, Brambilla E, De Wit R, Wilmotte A. 2003. Cyanobacterial diversity in natural and artificial microbial mats of Lake Fryxell (McMurdo Dry Valleys, Antarctica): a morphological and molecular approach. Appl Environ Microbiol. 69(9):5157-5169.
Tetreau G. 2018. Interaction between Insects, toxins, and bacteria: Have we been wrong so far? Toxins. 10(7): 281. DOI: 10.3390/toxins10070281
Thawabteh AM, Naseef HA, Karaman D, Bufo SA, Scrano L, Karaman R. 2023. Understanding the risks of diffusion of cyanobacteria toxins in rivers, lakes, and potable water. Toxins (Basel). 15(9):582.
Thomas RD. 1986. National research council (US) safe drinking water committee; Drinking water and health: Volume 6. Washington (DC): National Academies Press (US); 1986. 3, Reproductive Toxicology. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov. Accessed on 23 August 2024.
Visser PM, Ibelings BW, Bormans M. 2016. Artificial mixing to control cyanobacterial blooms: a review. Aquat Ecol. 50: 423-441. DOI: 10.1007/s10452-015-9537-0
Walton K and Berry JP. 2016. Indole alkaloids of the *Stigonematales* (*Cyanophyta*): Chemical diversity, biosynthesis and biological activity. Mar Drugs. 14(4):73. DOI:10.3390/md14040073
Watkins SM, Reich A, Fleming LE, Hammond R. 2008. Neurotoxic shellfish poisoning. Mar Drugs. 6(3):431-455. DOI:10.3390/md20080021
WHO. 2011. Guidelines for drinking-water quality - 4th ed. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data. 560 p.
Williams M, Armstrong L, Sizemore DC. 2023. Biologic, chemical, and radiation terrorism review. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan-. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK493217. Accessed on 23 August 2023.
Wood SA, Smith FMJ, Heath MW, Palfroy T, Gaw S, Young RG, Ryan KG. 2012. Within-mat variability in anatoxin-a and homoanatoxin-a production among benthic *Phormidium* (*Cyanobacteria*) Strains. Toxins. 4(10): 900-912. DOI: 10.3390/toxins4100900
Xu H, Pang Y, Li Y, Zhang S, Pei H. 2021. Using sodium percarbonate to suppress vertically distributed filamentous cyanobacteria while maintaining the stability of microeukaryotic communities in drinking water reservoirs. Water Res. 197:117111. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117111

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]

Zhang HH, Zhang XK, Si RR, Shen SC, Liang TT, Fan TT, Chen W, Xu LH, Han BN. 2020. Chemical and biological study of novel aplysiatoxin derivatives from the marine *Cyanobacterium Lyngbya* sp. Toxins (Basel). 12(11):733. DOI: 10.3390/toxins12110733
Zhao H, Wu L, Yan G, Chen Y, Zhou M, Wu Y, Li Y. 2021. Inflammation and tumor progression: signaling pathways and targeted intervention. Signal Transduct Target Ther. 6(1):263.
Zanchett G and Oliveira-Filho EC. 2013. *Cyanobacteria* and cyanotoxins: from impacts on aquatic ecosystems and human health to anticarcinogenic effects. Toxins (Basel). 5(10):1896-917.

Investigating the Potential of Toxins from Cyanobacterial Growth in Bioterrorism: The Need to Protective-Management Strategies for Aquaculture Center Employees

Ali Reza Radkhah[1], Soheil Eagderi [*1], Hadi Poorbagher[1], Sedigheh Atash Afrazeh[2]
1. Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Bachelor of Environment, Faculty of Natural Resources, Birjand University, Birjand, Iran.

soheil.eagderi@ut.ac.ir

Abstract

Blue-green algae or cyanobacteria are a group of algae that are able to grow rapidly in warm and nutrient-rich waters. The exponential growth of cyanobacteria in water bodies is affected by various factors, including an excess of nutrients, high temperatures, and excessive sunlight. Numerous studies have shown that with the increase in the growth of cyanobacteria in aquatic systems, there is also a possibility of an increase in toxins produced by them, which can have adverse effects on the health of aquatic animals and especially humans. Given the importance of the health of employees and local people in marine environments as well as workers in aquaculture centers, the present study aimed to introduce the most important and common toxins resulting from the growth of cyanobacteria and also to investigate the risks arising from them in order to determine the potential of these toxins in bioterrorism. For this purpose, 12 types of cyanobacterial toxins including including microcystin, nodularin, anatoxin-a, homoanatoxin, oscillatoxin A, cylindrospermopsin, nakienones A-C, aphantoxin, scytophycin/lyngbyatoxin, aplysiatoxin, and debromoaplysiatoxin were investigated. The results showed that among the aforementioned toxins, microcystin has received the most attention in scientific research compared to others, which can be attributed to the global prevalence of this toxin and its effects on human health. The effects of microcystin have often been manifested in the form of gastrointestinal diseases, liver and nerve damage, and cancer. Considering the adverse effects of these toxins, it is essential to employ various techniques to control and reduce the risks arising from the growth of cyanobacteria, as well as to adopt appropriate management decisions and strategies regarding the health of marine workers and people working in aquaculture centers who are exposed to the growth of cyanobacteria and their toxins.

Keywords: Cyanobacteria, Biological Toxins, Microcystin, Aquaculture Workers, Bioterrorism.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-12]