«مقاله مروری: ۱۴۴۲»

مروری بر تأثیر سموم سیانوباکتری‌ها در آب و مواد غذایی

بهاره نوروزی[۱*]، محمد جباری[۲]

۱- دانشیار گروه بیوتکنولوژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد زیست‌فناوری میکروبی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*نویسنده مسئول مکاتبات:bahareh.nowruzi@srbiau.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۴/۸)

چکیده

سویه‌های سیانوباکتری‌ها از مدت‌ها سال قبل بخشی از رژیم غذایی انسان بوده‌اند. شرایط محیطی مانند pH بالا، نور، دما و مواد مغذی منجر به تشکیل شکوفه جلبکی می‌شود. شکوفه‌های سیانوباکتری ممکن است سمی یا غیر سمی باشند؛ بنابراین مصرف سیانوباکتری‌های خوراکی مانند *اسپیرولینا* ممکن است خطر ابتلا به آب‌مروارید و تخریب عضلانی را افزایش دهند؛ بنابراین سیانوتوکسین‌ها گروه مهمی از ترکیبات شیمیایی ازلحاظ اکوتوکسیکولوژی و سم‌شناسی هستند. اگرچه شکوفه‌های سیانوباکتریایی در آب‌های شیرین به‌عنوان یک مشکل مهم اکولوژیکی و بهداشتی در سراسر جهان شناخته‌شده است، بااین‌وجود طیف وسیعی از سموم تولیدشده تاکنون شناخته‌نشده است. در این مقاله مروری اثرات سیانوتوکسین‌های تولیدشده توسط سیانوباکتری‌ها به‌ویژه در آب و غذا و پیامدهای بالقوه آن‌ها برای سلامتی انسان موردبررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: سموم سیانوباکتری‌ها، میکروسیستین، سیانوتوکسین، شکوفه جلبکی

مقدمه

سیانوباکتری‌های سمی و غیر سمی موجودات فتوسنتزی پروکاریوتی هستند که در اکثر اکوسیستم‌های آبی یافت می‌شوند. سیانوباکتری‌ها سیانوتوکسین‌هایی تولید می‌کنند که می‌توانند از طریق مصرف مستقیم غذا و آب آلوده به سیانوتوکسین تأثیرات مضری بر سلامت انسان داشته باشند. خطرات سیانوتوکسین در مناطق روستایی که مردم هنوز از آب‌های سطحی تصفیه نشده، برای مصارف خانگی استفاده می‌کنند، زیاد است. بیشتر مشکلات سلامتی که براثر سیانوتوکسین گزارش‌شده است بیشتر با مصرف طولانی‌مدت، قرار گرفتن در معرض پوست و استنشاق غلظت‌های پایین سیانوتوکسین میکروسیستین وβ متیلامینو آلانین مرتبط است. قرار گرفتن در معرض میکروسیستین با سرطان اولیه کبد و روده بزرگ در انسان مرتبط است (Wood, 2016; Dalu and Wasserman, 2018; Babica *et al.*, 2019; Gumbo *et al.*, 2022).

در کشورهای درحال‌توسعه، آب در ظروفی که ممکن است با سیانوتوکسین آلوده‌شده باشد جمع‌آوری و ذخیره می‌شود و اثرات جدی بر سلامت انسان دارد. محققان وجود سیانوباکتری‌های سمی و غیر سمی را در رسوبات رودخانه‌ها و مخازن آب‌های مصرفی که در ظروف پلاستیکی روشن (شفاف) یا تیره (غیر شفاف) ۲۰ یا ۲۵ لیتری جمع‌آوری می‌شوند را اثبات کردند (Gumbo *et al.*, 2022). این آب تا چند روز برای مصارف خانگی مانند پخت‌وپز، نوشیدن و شستن ظروف استفاده شود. ظروف شفاف می‌توانند رشد سیانوباکتری را افزایش دهند زیرا نور می‌تواند نفوذ کند و درنتیجه تولید سیانوتوکسین را افزایش دهد؛ بنابراین، وجود سیانوباکتری‌ها در آب ظرف می‌تواند نشان‌دهنده مسیر مهمی باشد که در آن انسان در معرض این سموم قرار می‌گیرد، به‌ویژه اگر شکوفه‌های سیانوباکتری سمی تولید سیانوتوکسین درجایی که آب جمع‌آوری می‌شود وجود داشته باشد. مطالعات در مورد آلودگی مواد غذایی با سیانوتوکسین بر روی محصولات آبزی (مانند ماهی، میگو، خرچنگ)، غلات (مانند برنج، سویا، گندم)، محصولات تازه (مانند کاهو) و مکمل‌های غذایی انجام‌شده است. بااین‌حال، در حال حاضر مطالعه‌ای در مورد آلودگی ذرت به سیانوباکتری‌های سمی و غیر سمی در طول تولید کنجاله ذرت انجام‌نشده است. در میان تمام غلات، ذرت مهم‌ترین است زیرا بخشی از رژیم غذایی روزانه بسیاری از مردم در کشورهای درحال‌توسعه را تشکیل می‌دهد و همچنین به‌عنوان دانه خوراکی برای حیوانات در سراسر جهان استفاده می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که انتقال سیانوتوکسین و تجمع زیستی می‌تواند در کل زنجیره غذایی رخ دهد (Gumbo *et al.*, 2022; Pham and Utsumi, 2018).

هدف این مقاله، مروری بر سیانوباکتری‌های تولیدکننده سیانوتوکسین در آب و غذا و پیامدهای بالقوه برای سلامت انسان است. علاوه بر آن، عوامل مؤثر بر رشد سیانوباکتری‌ها، طبقه‌بندی و وقوع سیانوتوکسین‌ها، مسیرهای قرار گرفتن انسان در معرض سیانوباکتری‌ها، شیمی، سم‌شناسی و تولید سیانوتوکسین‌ها موردبررسی قرار می‌گیرد.

-سیانوباکتری‌های تولیدکننده سیانوتوکسین

سیانوباکتری‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین تولیدکنندگان مواد آلی در نظر گرفته می‌شوند که حداقل ۲/۷ میلیارد سال است که وجود دارند و اکسیژن موجود در جو بدوی در ابتدا توسط این موجودات آزادشده است. شرایطی مانند اوتریفیکاسیون انسانی درنتیجه کشاورزی و شهرنشینی منجر به شکوفایی مداوم سیانوباکتری‌های سمی و غیر سمی در دستگاه‌های آب شیرین و آب‌شور در سراسر جهان شده است. این سیانوباکتری‌ها در حال تبدیل به یک مشکل برای محیط‌زیست و بهداشت عمومی جهانی درجایی هستند که در آن شرایط زیست‌محیطی برای تولید آن‌ها مساعد است و تمام منابع آب خانگی و کشاورزی مانند دریاچه‌ها/مخازن، رودخانه‌ها، چشمه‌ها و برکه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سیانوباکتری‌های سمی و غیر سمی، درست مانند سایر جلبک‌ها، دارای کلروفیل a هستند و می‌توانند از این طریق فتوسنتزانجام دهند (Hollister and Kreakie, 2016; Gumbo *et al*., 2022; Lee *et al*., 2017).

سیانوباکتری‌ها می‌توانند در شرایط نور کم زنده بمانند و با تغییرات دما یا شوری سازگار شوند. آن‌ها در سطوح آب زنده می‌مانند و به‌صورت گروهی یا رشته‌ای وجود دارند و قابلیت تکثیر سریع دارند و شکوفه‌ها به‌سرعت تشکیل می‌شوند. برخی از سیانوباکتری‌های سمی را می‌توان در رسوباتی که شبیه یک تفاله (رنگ آبی و سبز) هستند، یافت. برخی از سیانوباکتری‌های سمی را می‌توان در صورت به هم خوردن رسوبات یافت. علاوه براین، تخمین زده می‌شود که تقریباً بیش از ۲۰۰۰ گونه مختلف سیانوباکتری وجود دارد، اما سموم توسط حدود ۴۰ گونه تولید می‌شوند. درنهایت باید توجه داشت که سیانوباکتری‌ها در صورتی روی سطح آب شکوفا می‌شوند که دارای شرایط محیطی مناسب مانند PH بالا، دما، شدت نور و دسترسی به نیتروژن و فسفر باشد. سیانوباکتری‌های سمی نیز می‌توانند اکسیژن آب را مصرف کنند و در طول شب یک محیط کم اکسیژن ایجاد کنند؛ بنابراین، در طی این فرآیند، سیانوباکتری‌ها متابولیت‌های ثانویه‌ای به نام سیانوتوکسین آزاد می‌کنند که برای موجودات آبزی کشنده هستند (Olsen *et al*., Gumbo *et al*., 2022; 2018).

-عوامل مؤثر بر رشد سیانوباکتری‌ها

-درجه حرارت و نور

دمای بین ۲۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس باعث رشد بهینه سیانوباکتری‌ها می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که رشد میکروسیستین‌ها در دمای کمتر از ۱۵ درجه سلسیوس به‌شدت محدودشده است و دمای حدود ۲۵ درجه سلسیوس برای رشد سیانوباکتری‌ها مفید است؛ بنابراین رشد سیانوباکتری‌هادر طول تابستان بیشتر است زیرا دما معمولاً بالا است (Gumbo *et al*., 2022).

سیانوباکتری‌ها دارای دو سیستم برداشت نور هستند. کلروفیل a مسئول جذب نور در طول فتوسنتز است و مشاهدات نشان می‌دهد که به نظر می‌رسد سیانوباکتری‌ها شدت نور بالاتری را تحمل می‌کنند. شدت نور زیاد، با انتقال Fe^{3+} به سلول‌های جلبک میزان مصرف آهن سلولی را افزایش می‌دهد. نور Fe^{3+} را به Fe^{2+}تبدیل می‌کند که مسئول نرخ بالای رشد سیانوباکتری است. وجود وزیکول‌های تخصصی پر از گاز باعث حرکت عمودی سیانوباکتری‌ها در آب

می‌شود و این به سیانوباکتری‌ها وزن کمتری می‌دهد و باعث شناور شدن آن‌ها می‌شود (Gumbo *et al.*, 2022).

-فسفر و نیتروژن

فسفر و نیتروژن از مواد مغذی ضروری برای رشد سیانوباکتری‌ها هستند. سیانوباکتری‌های موجود در آب شیرین برای رشد مؤثر به فسفر بیشتری نسبت به نیتروژن نیاز دارند. کشاورزی و پساب فاضلاب منابع اصلی این مواد مغذی در این اکوسیستم‌ها هستند. نیتروژن مسئول اوتریفیکاسیون است. نرخ رشد میکروسیستین‌های سمی در غلظت‌های بالای نیتروژن در مقایسه با سویه‌های غیر سمی میکروسیستین بالا است. افزایش بارگذاری مواد مغذی همراه با عمق کم آب و دمای بالای آب به‌طور مؤثر رشد سیانوباکتری‌های سمی و غیر سمی را افزایش می‌دهد. آزمایش‌های زیستی نشان داده‌اند که نیتروژن و فسفر اثرات مشابهی بر رشد سیانوباکتری‌ها در تابستان دارند (Burkholder *et al.*, 2016; Gumbo *et al.*, 2022).

-طبقه‌بندی سیانوتوکسین‌ها

سیانوباکتری‌ها ترکیبات زیست فعالی به نام سیانوتوکسین تولید می‌کنند. این ترکیبات سیانوتوکسین به‌شدت برای انسان، حیوانات و سایر گیاهان مضر هستند، زیرا تماس با این سموم می‌تواند باعث تحریک، ناراحتی گوارشی و اثرات مسمومیت حاد، مزمن و همچنین کشنده شود. در طبقه‌بندی سیانوتوکسین‌ها بر اساس ساختار شیمیایی و مکانیسم‌های عمل به سه نوع مختلف تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: (الف) پپتیدها (هپاتوتوکسین‌ها). (ب) آلکالوئیدها (نوروتوکسین‌ها، سیتوتوکسین‌ها) و (ج) سموم تحریک‌کننده لیپوپلی ساکاریدها (Lipopolysaccharide) (LPS) (درماتوکسین‌ها) (جدول 1) (Gumbo *et al.*, 2022).

جدول (۱): انواع توکسین‌ها، اثرات کوتاه و بلندمدت مؤثر در سلامتی انسان‌ها (Gumbo *et al.*, 2022).

توکسین	اثرات کوتاه‌مدت سلامتی	اثرات بلندمدت سلامتی
میکروسیستین‌ها	دردهای گوارشی، التهاب و خونریزی کبد، نارسایی کبد منجربه‌مرگ، ذات‌الریه و درماتیت	پروموتور تومور و نارسایی کبد منجر به مرگ می‌شود
نودولارین‌ها	مشابه میکروسیستین‌ها	مشابه میکروسیستین‌ها
ساکسی توکسین‌ها	سوزن سوزن شدن، سوزش، بی‌حسی، خواب‌آلودگی، گفتار نامنسجم و فلج تنفسی منجر به مرگ	بی‌حسی دهان، گلو و اندام‌ها، فلج حاد عضلانی و نارسایی تنفسی
آناتوکسین‌ها	سوزن سوزن شدن، سوزش و فلج تنفسی منجر به مرگ می‌شود	آریتمی قلبی که منجر به مرگ می‌شود
β -N- متیلامین -ال-آلانین (BMAA) (β-Methylamino-L-alanine)	سرگردانی، نوسانات خلقی، از دست دادن انگیزه، و مسائل رفتاری	سرطان
سیلندراسپرموپسین	دردهای گوارشی، التهاب کبد و خونریزی، پنومونی و درماتیت	کسالت، بی‌اشتهایی و نارسایی کبد منجر به مرگ می‌شود

لیپوپلی ساکارید	دردهای گوارشی و درماتیت	تب، لکوپنی، افت فشارخون، اختلال عملکردقلبی-ریوی، انعقاد داخل عروقی
بایاتوکسین‌های هدر	درماتیت تومورهای پوستی	درماتیت حاد و آسیب کلیه

برخی از سیانوتوکسین‌ها می‌توانند توسط جنس‌های مختلف سیانوباکتری تولید شوند. به‌عنوان‌مثال، میکروسیستین شناخته‌شده‌ترین سیانوتوکسین است که می‌تواند توسط چندین جنس مانند *آنابنا* (*Anabaena*)، *میکروسیستین* (*Microcystis*)، *نوستوک* (*Nostoc*) و *پلنکتوتریکس* (*Planktothrix*) تولید شود. این جنس‌ها می‌توانند انواع مختلفی از سیانوتوکسین‌ها را تولید کنند، این جنس‌ها می‌توانند انواع مختلفی از سیانوتوکسین‌ها را تولید کنند به‌عنوان‌مثال *آنابنا* تولیدکننده میکروسیستین، آناتوکسین و BMAA است (Gumbo *et al*., 2022; Dao *et al*., 2018).

-آلکالوئیدها

آنابنا، اسیلاتوریا و گونه‌های دیگر مانند آفانیزومنون و سایلندروسپرموم، آلکالوئیدهایی را با نوروتوکسین آناتوکسین a-تولید می‌کنند که عامل مسدودکننده عصبی-عضلانی دپلاریز کننده پس سیناپسی است. آناتوکسینa با توجه به گونه حیوانی، مقدار سیانوتوکسین مصرفی حیوان و مقدار غذای موجود در معده می‌تواند در عرض چند دقیقه تا چند ساعت باعث مرگ شود. تماس یا مصرف آناتوکسین A منجر به مسمومیت، ایجاد انقباضات خود به خودی عضلات، کاهش حرکت، کبودی پوست، تنفس شکمی، تشنج و حتی مرگ می‌شود. آناتوکسینs یکی دیگر از سیانوتوکسین‌های آلکالوئیدی است که عامل ترشح بزاق است. این آلکالوئید بسیار سمی است اما تا حدی ناپایدار است و با افزایش دما (۴۰ درجه سلسیوس) و قلیایی بودن pH غیرفعال می‌شود (Gumbo *et al*., 2022).

نوروتوکسین دیگری در خانواده آلکالوئیدها وجود دارد که به سم صدف فلجی معروف است. این آلکالوئید توسط آنابنا، آفانیزومنون، سایلیندروسپرموپسیس، لینگبیا و پلانکتوتریکس تولید می‌شود که ساکسی توکسین است. سیلندرسپرموپسین آلکالوئید دیگری است که منجر به نوروتوکسیکوز نمی‌شود، بلکه به سموم کبدی و کلیوی منجر می‌شود و توسط سیلندرسپرموپسین تولید می‌شود (umbo *et al*., 2022; Nowruzi and Porzani, 2021).

-پپتیدها

هپاپپتیدهای حلقوی، به نام میکروسیستین و پنتاپپتیدها که به‌عنوان نودولارین شناخته می‌شوند، ازنظر ساختاری وزن مولکولی کمی دارند و باعث مسمومیت انسان و حیوان می‌شوند که شامل هپاتوتوکسیکوزیس حاد می‌شود. این هپتاپپتیدهای حلقوی توسط نودولاریا اسپومیجنا، پلانکتوتریکس موگتی، میکروسیستیس ویریدیس، کموفرون تینوس و آنابنا فلوس آکآ تولید می‌شوند. میکروسیستین، جنس اصلی تولیدکننده سم پپتید است و این جنس در سراسر جهان یافت می‌شود (Gumbo *et al*., 2022).

درنهایت، پپتیدهای غیر حلقوی و اسیدهای آمینه تولیدشده توسط سایر سیانوباکتری‌ها وجود دارد و این پپتیدها و اسیدهای آمینه می‌توانند فعالیت زیستی (دارویی) داشته باشند. BMAA یک اسیدآمینه با فعالیت دژنراتیو عصبی است که اخیراً موردبررسی قرارگرفته است. این اسیدآمینه احتمالاً شایع‌تر است زیرا در غذاهای دریایی آلوده و صدف‌ها و منابع آب آشامیدنی و آب‌های تفریحی یافت می‌شود (Nowruzi and Becerra-Absalón, 2022). BMAA به‌عنوان علت اصلی اسکلروز یا زوال عقل گزارش‌شده است که در اصل از سیکاس سیرسینالیس جداشده است. BMAA یک اسیدآمینه غیر پروتئینی است که توسط همزیستی ریشه سیکاس با سیانوباکتری از جنس نوستوک و سایر سیانوباکتری‌ها مانند نودولاریا اسپنجینا، نوستوک، تریکودسمیوم تیباتی و لینگبیا ماجوسکول تولید می‌شود. BMAA منجر به آزادسازی آهسته سموم در اثر هیدرولیز پپتید می‌شود (Gumbo *et al*., 2022).

-لیپوپلی ساکاریدها (LPS)

محققان LPS را از سیانوباکتریوم آناسیستیس نیدولانس جدا کردند. LPS ها اندوتوکسین نیز نامیده می‌شوند و به‌طورکلی در غشای خارجی دیواره سلولی باکتری‌های گرم منفی و سیانوباکتری‌ها یافت می‌شوند LPSبخش مهمی از دیواره سلولی است. LPS سیانوباکتری‌ها در مقایسه با LPS باکتری‌های گرم منفی، سمیت کمتری دارند (Gumbo *et al*., 2022).

-تفاوت‌ها و شباهت‌های سیانوباکتری‌های سمی و غیر سمی

گونه‌های خاص سیانوباکتری‌ها می‌توانند سمی یا غیر سمی باشند. سیانوباکتری‌های غیر سمی، مانند سیانوباکتری‌های حاوی سم، منجر به کاهش رشد و تولیدمثل جانوران آبزی می‌شوند. تحقیقات انجام‌شده در سراسر جهان نشان می‌دهد که تا ۷۵ درصد از شکوفه‌های سیانوباکتری‌ها می‌توانند غیر سمی باشند. سویه‌ای از سیانوباکتری‌ها که قادر به سنتز سیانوتوکسین‌ها نیست، به‌عنوان غیر سمی نامیده می‌شوند. جدول (۲) پپتیدهای مختلف تولیدشده توسط جنس‌های مختلف سیانوباکتری‌های سمی مانند آنابنا، نوستوک، میکروسیستیس و نودولاریا را نشان می‌کند (Gumbo *et al*., 2022).

جدول (۲). پپتیدهای جداشده از سیانوباکتری‌های سمی و غیرسمی (Gumbo *et al*., 2022).

(M: Microcystis aeruginosa, A: Anabaena sp., O: Oscillatroia (Planktothrix) agardhii, N: Nodularia spumigena.)

گونه	گروه	پپتید (سیانوباکتری)
سمی	دپسی پپتید حلقوی	آئروژینوپپتین (M)
		انابانوپتیلیدها (A)
		اسیلاپپتیلیدها (o)
	پپتید سیکلی دارای پیوند یوریدو	انابانوپتیلید (A O)
		ندولاپپتین (N)
	پپتید حلقوی دارای اسیدآمینه	نوستوفیاسین
	پپتید سیکلیک	اسیلاسایکلین (O)
	پپتید خطی	اسپومیجین‌ها (N)

غیر سمی	پپتید سه حلقه‌ای	میکروویریدین (O) I
	ترکیب گلیکوزیدی	سومیلیدها (N)

-توزیع سیانوتوکسین‌ها

مطالعات فراوان بعد از مصرف مکمل‌های غذایی حاوی جلبک‌ها انجام شد. مصرف‌کنندگان پس از مصرف این محصولات شکایت کردند. برای تعیین غلظت میکروسیستین از روش الایزا و مهار پروتئین فسفاتاز استفاده شد. یافته‌ها نشان داد که این محصولات برای مصرف انسان مناسب نیستند؛ بنابراین، مواد سمی و ترکیبات تحریک‌کننده‌ای که منجر به اسهال و حالت تهوع می‌شوند در همه محصولات شناسایی شد. این مطالعه نشان داد که مستندات کافی در مورد تأثیر مکمل‌های غذایی حاوی سیانوباکتری‌ها بر سلامت انسان وجود دارد. علاوه بر آن چندین مطالعه میکروسیستین (Microcystin) (MC) را در بافت‌های گیاهان خشکی زی و آبزی در معرض با سیانوتوکسین‌ها اثبات کردند (Gumbo *et al.*, 2022; Lima *et al.*, 2021).

یافته‌های یک آزمایش گلخانه‌ای نشان داد که یک فرد با وزن ۶۰ کیلوگرم، سالاد تازه با وزن ۶۵ تا ۷۵ گرم با وزن خشک ۶/۸ تا ۷/۹ گرم مصرف می‌کند. این سالاد شامل کاهوی آبیاری شده با آب آلوده به میکروسیستین بود و درنتیجه غلظت میکروسیستین مصرف‌شده ۵/۸ گرم در هر وعده غذایی توسط این فرد بود که این میزان بالاتر از کل مصرف روزانه تعیین‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی یعنی ۰,۰۴ µg / kg بود. نتایج مطالعه دیگر نشان می‌دهد که گیاهان پس از ۱۴ روز قرار گرفتن در معرض µg/ml ۳ در میلی‌لیتر میکروسیستین، غلظت ۱۴۱/۱۰µg میکروسیستین را انباشته می‌کنند. این یافته‌ها ثابت می‌کند که هنگامی‌که گیاهان در معرض آب حاوی MC قرار می‌گیرند، پس از مصرف تجمع زیستی می‌کنند و به انسان منتقل می‌شوند، بنابراین سلامت انسان را به خطر می‌اندازند (Gumbo *et al.*, 2022).

علاوه براین، مطالعه دیگری در آفریقای جنوبی انجام شد وجود سیانوباکتری‌ها و سموم مربوط به این سیانوباکتری‌هارا در ظروف پلاستیکی مورداستفاده برای جمع‌آوری و ذخیره آب بررسی کرد. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که سیانوباکتری‌های موجود در ظروف از منابع آب به این ظروف منتقل‌شده و به‌صورت بیوفیلم رشد می‌کنند. اگرچه سیانوتوکسین‌ها در غلظت‌های پایین یافت می‌شوند، اما می‌توانند در درازمدت خطراتی برای سلامتی انسان ایجاد کنند؛ بنابراین نتایج نشان می‌دهد که این می‌تواند راه ساده دیگری برای قرار گرفتن انسان در معرض این سموم باشد. محققان به این نتیجه رسیدند که اگرچه ترکیب بیوفیلم موردبررسی قرار نگرفت، اما نتایج نشان داد که تعداد سیانوباکتری‌ها در ظروف، به‌ویژه ظروف دارای نور، افزایش می‌یابد. درنهایت نتایج نشان داد که میکروسیستیس جنس غالب سیانوباکتری‌های ثبت‌شده در این مطالعه بود (Gumbo *et al.*, 2022).

-اثرات مفید سیانوباکتری‌ها در سلامت انسان

انسان‌ها برای قرن‌ها گونه‌های خاصی از جلبک‌های سبز آبی (BGA) (Blue-green algae) مانند آرتروسپیرا پلتنسیس، آفانیزومنون فلوس آکوآ، اسیلاتوریا فونیفورمیس و نوستوک اسفرویدس را

مصرف می‌کنند. جلبک‌های سبز آبی محصولات طبیعی مغذی و غنی از اسیدهای آمینه مهم و ترکیبات فعال زیستی مانند ویتامین‌هایB ، فیبر، فسفر، کلسیم و آهن هستند .تحقیقات نشان داده است که BGA حاوی مکمل‌های ضدویروسی، ضدالتهابی، ضد تومور، ضد حساسیت، آنتی‌اکسیدان و ضد دیابت هستند (Nowruzi *et al.* 2023). جلبک‌های سبز آبی دارای چندین مزیت غذایی و سلامتی هستند، آن‌ها حاوی پروتئین، ویتامین Cو ویتامین E و برخی مواد معدنی هستند. آن‌ها برای اهداف یا مزایای مختلفی مانند کاهش وزن، تقویت سیستم ایمنی و کنترل سطح کلسترول مصرف می‌شوند (Gumbo *et al*., 2022; Al-Thawadi, 2018).

مکمل‌های غذایی حاوی مواد افزودنی مضر بسیاری است. این مواد افزودنی مضر در برخی از محصولات مکمل غذایی که مردم مصرف می‌کنند شناسایی‌شده است. افرادی که از این محصولات حمایت می‌کنند ادعا می‌کنند که حافظه و هضم را بهبود می‌بخشند و وضوح ذهنی و سایر مزایا را افزایش می‌دهند. آلرژی، افسردگی و سایر شرایط پزشکی متعدد توسط جلبک‌های آبی سبز درمان یا درمان شده است، زیرا محققان گزارش دادند که این جلبک‌ها مغذی هستند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها، احتمال نقش یک ترکیب جداشده از جلبک سبز آبی را در بیماری آلزایمر نشان داده است (Gumbo *et al*., 2022).

-مسمومیت ایجادشده توسط سیانوتوکسین‌ها برای انسان

مسمومیت انسان توسط میکروسیستین‌ها در سراسر جهان بسیار شایع است. بیشتر مشکلات سلامتی گزارش‌شده با قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض غلظت کم میکروسیستین مرتبط است. شواهد انجام‌شده توسط مطالعات in vivo و in vitro نشان داد که بیشترین اندام آسیب‌دیده در انسان کبد است و سایر اندام‌ها مانند کلیه‌ها و روده بزرگ نیز از طریق قرار گرفتن در معرض سم تحت تأثیر قرار می‌گیرند. بیماری‌های منتسب به مسمومیت با میکروسیستین‌ها شامل گاستروانتریت، آلرژی، بیماری‌های کبدی و واکنش‌های تحریکی است. قرار گرفتن در معرض میکروسیستین و سمیت با سرطان روده در جمعیت انسانی مرتبط است و برخی از ضایعات می‌توانند به تومور و سرطان اولیه کبد تبدیل شوند (Nowruzi, 2023 ; Gumbo *et al*., 2022; McLellan and Manderville, 2017).

قرار گرفتن در معرض سموم سیانوباکتریایی می‌تواند باعث مرگ‌ومیر انسانی شود. میزان مجاز مصرف میکروسیستین LR در آب آشامیدنی توسط سازمان بهداشت جهانی، ۱ میکروگرم در لیتر معرفی‌شده است. برزیل در سال ۱۹۹۶ مرگ ۷۶ بیمار را براثر عوارض کبدی مرتبط با استفاده از آب آلوده به سیانوتوکسین‌ها گزارش کرد. این گزارش نشان داد که بیمارانی که تحت درمان دیالیز کلیه قرار می‌گیرند، از سردرد، درد چشم، تاری دید، تهوع و استفراغ شکایت می‌کنند. تجزیه‌وتحلیل انجام‌شده تأیید کرد که کربن فعال مورداستفاده در سیستم تصفیه آب کلینیک‌ها حاوی میکروسیستین و سیلندراسپرموپسین است؛ بنابراین مشخص شد که خون و کبد بیماران دارای میکروسیستین است. در برزیل، قرار گرفتن در معرض تصادفی با آنابنا و میکروسیستیس منجر به حدود ۲۰۰۰ مورد گاستروانتریت و ۸۸ مرگ‌ومیر شد که در یک دوره ۴۲ روزه رخ داد. در انگلستان، هنگامی‌که دو سرباز ارتش در یک تمرین آموزشی بودند، از یک

مخزن که حاوی شکوفه‌های میکروسیستیس آئروژینوزا بود، آب نوشیدند و پنج روز بعد با درد شکم، استفراغ، ذات‌الریه و مسمومیت سیانوباکتریایی مواجه شدند (Gumbo *et al*., 2022).

در جزیره پالم، در نزدیکی استرالیا، یک شکوفه سیانوباکتری با سولفات مس تیمار شد و این باعث لیز سلولی و انتشار سیانوتوکسین‌ها در آب شد. مصرف آب آن جزیره توسط افراد محلی منجر به مشکلات کبدی و کلیوی شد. به‌غیراز آلوده شدن از طریق تأمین آب، انسان می‌تواند از طریق زنجیره غذایی نیز تحت تأثیر سیانوتوکسین‌ها قرار گیرد. مطالعات متعدد نشان‌دهنده وقوع تجمع زیستی سیانوتوکسین‌ها و انتقال از طریق زنجیره غذایی است. این احتمال وجود دارد که این سموم می‌توانند از طریق مصرف ماهی به انسان برسند .تقریباً ۲۰۰۰ مورد مسمومیت انسانی با ۱۵٪ مرگ‌ومیر در هرسال گزارش‌شده است و این به دلیل مصرف ماهی یا صدف است که از تولیدکننده‌های ساکسیتوکسین‌های دریایی تغذیه می‌شوند. علائم چنین مسمومیتی شامل سرگیجه، بی‌حسی دهان و اندام‌ها، ضعف عضلانی، تهوع، استفراغ و تشنگی است و این علائم ممکن است ۵ دقیقه پس از مصرف شروع شود و مرگ ممکن است از دو تا ۱۲ ساعت رخ دهد. مطالعات اخیر اشاره می‌کنند که وجود غلظت پایین میکروسیستین‌ها در آب مورداستفاده برای مصرف ممکن است باعث بسیاری از مشکلات سلامتی حاد و مزمن شود. احتمال نگران‌کننده‌ای وجود دارد که قرار گرفتن انسان در معرض دوزهای غیر کشنده این ترکیبات ممکن است منجر به توسعه سرطان شود و این امر با کشف اینکه هپاتوتوکسین‌های سیانوباکتری باعث مهار پروتئین فسفاتاز می‌شوند قوت گرفته است (Gumbo *et al*., 2022).

-سیانوتوکسین‌های موجود در مواد غذایی

گیاهان، سموم را از آب‌های آلوده به سیانوتوکسین دریافت می‌کنند. رشد گیاهان و عملکرد محصول تحت تأثیر غلظت سیانوتوکسین‌های مرتبط با محیط‌زیست است. خاک سموم را حفظ می‌کند و سموم می‌توانند به‌صورت زیستی انباشته شوند. همچنین مطالعات نشان داده‌اند که سبزی‌های برگ‌دار آبیاری شده با آب (مانند دریاچه، آب‌های زیرزمینی) آلوده به سموم، ۲۷ درصد از میکروسیستین را جمع می‌کنند. در مطالعات مختلف نشان داده‌شده است که کاهو پر از سیانوتوکسین‌ها است و مطالعات روی این سبزی ناشی از مصرف زیاد آن است. بااین‌حال، میزان تجمع سم به زمان و دفعات مواجهه بستگی دارد؛ بنابراین، گیاهانی که برای مدت طولانی در معرض آب قرار می‌گیرند یا به‌طور مکرر با آب آلوده آبیاری می‌شوند، می‌توانند سیانوتوکسین‌ها را تجمع کنند. نتایج نشان داد که تقریباً ۱۷۷/۸ میکروگرم بر کیلوگرم میکروسیستین در کاهو انباشته می‌شود. نتایج مشابهی برای لوبیا و سایر سبزی‌ها مشاهده شد. همچنین مطالعاتی بر روی تجمع سیانوتوکسین در غلاتی مانند برنج، سویا و گندم نیز انجام‌شده است. مشکل نگران‌کننده این است که دوز قرار گرفتن در معرض سیانوتوکسین‌ها در غلات نسبت به سایر محصولات بیشتر است، زیرا غلات یک غذای اصلی در سراسر جهان هستند و میزان مصرف در هر وعده غذایی در بسیاری از کشورها بالا است. به‌عنوان‌مثال، آرد تولیدشده از دانه‌های سیکاس میکرونسیکا (*Cycas micronesica*) آن را به‌عنوان منبعی از یک سم عصبی

محیطی تبدیل کرد. سموم متعددی مانند BMAA دردانه‌های سیکاد شناسایی‌شده است. BMAA که توسط سیانوباکتریوم اندوسیمبیوتیک، نوستوک، در ریشه‌های سیکاس میکرونسیکا تولید می‌شود برای حیوانات مانند میمون‌ها عصبی‌کننده است. مصرف غلظت زیادی از سیانوتوکسین‌ها می‌تواند از تجمع زیستی سیانوتوکسین‌ها در مواد غذایی شامل غذاهای دریایی، محصولات آبزی، حیوانات و محصولات زراعی ناشی شود. مطالعات بسیاری بر تجمع زیستی سیانوتوکسین‌ها در محصولات آبی، غلات، محصولات تازه و مکمل‌های غذایی که در جدول (۳) نشان داده‌شده است، تمرکز دارند (Gumbo *et al*., 2022).

جدول (۳): تجمع زیستی سیانوتوکسین‌ها در حیوانات آبزی که در آب‌های آلوده به سیانوباکتری زندگی می‌کنند (Gumbo *et al*., 2022).

نوع غذا	نام غذا	سیانوتوکسین	غلظت
غذاهای آبزی	ماهی	MCs	۷۱/۶µg/kg
		STS	۰ /۸۳ µg/g
		ATX-a	۰/۷۶ µg/g
	صدف و خرچنگ	MCs	۵/۷۹µg/g
	میگو	MCs	۱۵/۲ µg/g
محصولات زراعی	کاهو	MCs	۸/۳۱–۱۷۷/۸ µg/kg
	شبدر	MCs	۲/۱۴ µg/kg
	شلغم	MCs	۰/۷۸ µg/kg
ریشه سبزی‌ها	هویج	MC-LR	۵/۲۳ µg/g
غلات	برنج	MC-LR	محدوده بین ۲۲ تا ۳۶۵ میکروگرم بر کیلوگرم
مکمل‌های غذایی	اسپیرولینا	MC-LR	۰/۴۷ –۲/۳۷ µg/g
	آفانیزونمون	STX	۰/۴۸- ۲/۴۳µg/g
میوه‌ها	گوجه‌فرنگی سبز و رسیده	MC-LR	۱۰/۸µg/kg و ۵۴ µg/kg
	سیب‌زمینی شیرین	MC-LR	۰/۰۷۷ –۰/۱۱۸ µg/kg

حیوانات آبزی می‌توانند سیانوتوکسین‌ها را از طریق خوراک‌های آلوده، تماس مستقیم با آب آلوده (محیط زندگی) و از طریق شبکه غذایی ذخیره کنند. اندام‌های مختلف، ازجمله کبد، روده و بافت ماهیچه‌ای چندین نمونه ماهی جمع‌آوری‌شده از ۹ دریاچه واشنگتن که شکوفه‌های سمی را تجربه کرده‌اند، دارای ساکسی توکسین و میکروسیستین هستند. غلظت ۰,۸۳ میکروگرم در گرم ساکسی توکسین، ۷۱,۶ میکروگرم در گرم میکروسیستین و ۰,۷۶۸ میکروگرم بر گرم آناتوکسین a-در نمونه‌های ماهی شناسایی شد که نشان‌دهنده خطر بالای قرار گرفتن در معرض

سیانوتوکسین است، همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده‌شده است (Gumbo *et al*., 2022).

تجمع زیستی سیانوتوکسین‌ها در ماهی به انسان بستگی دارد و در روده و کبد آن‌ها زیاد است، اما در ماهیچه‌ها تا بیست برابر کمتر است. این می‌تواند به این دلیل باشد که جذب سیانوتوکسین‌ها از طریق دستگاه روده و برای سلول‌های کبدی از طریق انتقال‌دهنده‌های اسید صفراوی انجام می‌شود؛ بنابراین، بافت‌های روده و کبد بیشتر سموم را جمع‌آوری می‌کنند و بقیه سموم به ماهیچه‌ها منتقل می‌شوند .توجه به این نکته حائز اهمیت است که بسیاری از مردم جهان احشاء ماهی را به‌عنوان بخشی از رژیم غذایی خود می‌خورند که آن‌ها را در معرض خطر بالایی برای مسمومیت با سیانوتوکسین قرار می‌دهد. میکروسیستین‌ها در سایر محصولات آبزی مانند دوکفه‌ای و سخت‌پوستان از طریق مسیر مشابهی شناسایی‌شده‌اند. غلظت میکروسیستین‌ها در دوکفه‌ای‌ها و خرچنگ‌ها به ۵/۷۹ میکروگرم در گرم می‌رسد که نسبتاً کمتر از میکروسیستین‌ها در ماهی است همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده‌شده است. این ممکن است با سطوح تغذیه‌ای آن‌ها در شبکه غذایی توضیح داده شود. یکی دیگر از محصولات آبی که می‌تواند سیانوتوکسین را انباشته کند، کوسه است. مطالعات نشان می‌دهد که بافت‌های کوسه حاوی BMAA است که یک اسیدآمینه غیر پروتئینی است که توسط سیانوباکتری‌ها تولید می‌شود. نتایج حاصل از مطالعه مشترک میزان غلظت ۱۸۳۶-۱۴۴ میکروگرم بر میلی‌گرم را در ۲۳ نمونه از ۲۹ نمونه کوسه نشان داد. این واقعیت که BMAA با بیماری‌های عصبی مرتبط است، منجر به این پیشنهاد می‌شود که مصرف باله‌های کوسه ممکن است خطر قرار گرفتن انسان در معرض نوروتوکسین سیانوباکتری BMAAرا افزایش دهد (Gumbo *et al*., 2022).

-مسیرهای قرار گرفتن انسان در معرض سیانوتوکسین‌ها

چندین راه اصلی وجود دارد که انسان می‌تواند در معرض سیانوتوکسین‌ها قرار گیرد. این راه‌ها شامل مصرف تصادفی و مداوم غذا یا آب حاوی سیانوتوکسین است. تماس پوست با سیانوتوکسین‌ها هنگام شنا یا حمام کردن؛ و مسیرهای دیگری که در زیر موردبحث قرار می‌گیرد:

-بلع آب آشامیدنی آلوده

یکی از راه‌های رایج مصرف سیانوتوکسین از طریق نوشیدن آب آلوده به سیانوتوکسین است. این سموم احتمالاً هنگامی‌که در طی تجزیه خود آزاد می‌شوند، آب را آلوده می‌کنند. محققان در موارد متعددی، سموم سیانوباکتری‌ها را در آب‌های تصفیه‌شده و تصفیه نشده در سراسر جهان در کشورهایی مانند آرژانتین، استرالیا، بنگلادش، کانادا، جمهوری چک، چین، فنلاند، فرانسه، آلمان، لتونی، لهستان، تایلند، ترکیه، اسپانیا، سوئیس و ایالات‌متحده آمریکا مشاهده کردند. مصرف آب با مقدار زیاد سیانوتوکسین یا مصرف مداوم مقدار کمی از این سموم با افزایش خطرات سلامتی انسان همراه است. به‌عنوان‌مثال سرطان کبد اولیه (PLC) (Phospholipase C) توسط هپاتوتوکسین‌ها در آب آشامیدنی ایجاد می‌شود. این در تحقیقات انجام‌شده در صربستان تأییدشده است که نشان می‌دهد مصرف آب آشامیدنی آلوده به میکروسیستین‌ها با PLC در انسان مرتبط است (Gumbo *et al*., 2022; Meneely *et al*., 2018).

-قرار گرفتن از طریق استنشاق و تماس پوستی

این اتفاق در آب‌هایی می‌افتد که برای اهداف تفریحی استفاده می‌شود. قرار گرفتن در معرض آب‌های حاوی شکوفه سیانوباکتری منجر به علائم مختلفی می‌شود که شامل آسم، بثورات پوستی، ذات‌الریه، علائم گوارشی و سرفه پراکنده خشک همراه با استفراغ و همچنین بیماری‌های حاد با علائمی مانند سردرد شدید و تاول دردهان می‌شود. مطالعه‌ای توسط محققان تأیید می‌کند که شهروندان ژاپن، هاوایی، استرالیا و فلوریدا از این علائم رنج می‌برند. این علائم پس از تماس فرد، از طریق شنا کردن یا تماس با آبی که سطح آن دارای یک‌لایه سیانوباکتری است که توسط امواج جداشده است، رخ می‌دهد. پوستی که در تماس با چنین آبی قرار می‌گیرد تحریک می‌شود، چند دقیقه پس از شنا در چنین آب آلوده‌ای با تاول‌ها و پوسته‌پوسته شدن عمیق (لایه‌برداری پوست) و به دنبالان درماتیت قابل‌توجه و قرمزی که پس از ۳ تا ۸ ساعت ایجاد می‌شود، شروع به خارش و سوزش می‌کند. یکی از مهم‌ترین مسیرهای قرار گرفتن با سیانوتوکسین‌ها، استنشاق است. ناراحتی تنفسی، ناشی از قرار گرفتن با مواد غذایی موجود در آب‌های دریایی و شیرین گزارش‌شده است. تزریق MC-LR به داخل بینی موش باعث آسیب کبدی و نکروز گسترده اپیتلیوم ناحیه بویایی و تنفسی می‌شود. این حساسیت‌ها تقریباً ۱۰ برابر بیشتر از مصرف آن‌ها به‌صورت خوراکی است (Ahari *et al*., 2022).

بنابراین تنفس سیانوتوکسین‌ها در حین دوش گرفتن یا فعالیت‌های تفریحی یا در حین استفاده از آب در فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی باید به‌عنوان خطری برای سلامتی در نظر گرفته شود زیرا این‌ها می‌توانند راه‌های احتمالی دیگری باشند که منجر به‌قرار گرفتن در معرض سیانوتوکسین‌ها می‌شود (Gumbo *et al*., 2022; Hutárová *et al*., 2022).

عملکرد و کیفیت گیاه زمانی که محصولات با آب‌های سطحی حاوی سیانوباکتری‌ها آبیاری می‌شوند، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. اگر جذب MC از حد مجاز توصیه‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی فراتر رود، گیاه آسیب‌دیده ممکن است خطراتی برای سلامتی انسان و حیوان ایجاد کند. سلامت انسان و حیوانات می‌تواند از طریق مصرف گیاهان آسیب‌دیده تهدید شود. گیاهان می‌توانند به‌طور نامطلوبی تحت تأثیر سیانوتوکسین‌ها قرار گیرند. رشد بسیاری از گیاهان را می‌توان با قرار گرفتن گیاه در معرض سیانوتوکسین‌ها مهار کرد. مطالعات نشان داده‌اند که عصاره سیانوباکتری حاوی MC-LR به‌طور متفاوتی بر رشد، نمو، فعالیت فتوسنتزی، بهره‌وری و تغذیه معدنی گندم، ذرت، نخود و عدس تأثیر می‌گذارد. درواقع، MC-LRتوسط هم گیاهان آبزی و همچنین گیاهان در حال رشد جذب می‌شود و این سموم در بافت ساقه آن‌ها انباشته می‌شوند (Gumbo *et al*., 2022).

-مسمومیت حاصل از سیانوباکتری‌ها در غذاهای دریایی

تجمع زیستی سیانوتوکسین‌ها می‌تواند در افرادی که غذای آبزی مصرف می‌کنند، رخ دهد. مطالعات حضور MC را در میگوهای آب شیرین و خرچنگ باتلاق قرمز شناسایی کرد. علاوه بر آن، سیلندراسپرموپسین در همولنف‌های دوکفه‌ای، احشاء، غدد جنسی و پاها شناسایی شد. علاوه براین، MCدر هپاتوپانکراس، احشاء، غدد جنسی و آبشش حلزون آب شیرین شناسایی شد. نکته مهمان است که بیشتر سموم

در قسمت‌های غیرقابل‌خوردن یافت می‌شوند، به این معنی که جدا کردن پانکراس، دستگاه گوارش و غدد جنسی قبل از مصرف می‌تواند خطر مسمومیت را کاهش دهد. بااین‌حال، برخی از غذاهای آبزی مانند حلزون‌ها معمولاً به‌طور کامل آب پز می‌شوند اما بسیاری از سموم سیانوباکتری را نمی‌توان با جوشاندن از بین برد (Gumbo *et al*., 2022).

محققان دریافتند که سیانوتوکسین‌ها درنهایت از طریق زنجیره غذایی آبزیان و تجمع زیستی به انسان می‌رسند. ماهی در بالای این زنجیره غذایی آبزی قرار دارد. ماهی‌ها از طریق تنفس و تغذیه سیانوتوکسین‌ها را در اندام‌هایی مانند آبشش، ماهیچه‌ها، کبد، روده‌ها و کلیه‌ها انباشته می‌کنند که باعث می‌شود بیشتر در معرض این سموم قرار بگیرند. نتایج حاصل از مطالعه دیگری، تجمع بالایی از میکروسیستین‌ها را در کبد، روده، آبشش و ماهیچه‌های ماهی تشخیص داد (Sabzevari *et al*., 2022; Gumbo *et al*., 2022).

-مکمل‌های غذایی حاوی سیانوباکتری‌ها

سیانوباکتری‌ها و ریز جلبک‌ها به‌عنوان مکمل‌های غذایی در سراسر جهان استفاده می‌شوند زیرا دارای مزایای سلامتی مانند تأمین ویتامین‌ها، خواص ضد توموری و یا ضد باکتریایی هستند. نادیده گرفتن پتانسیل آلودگی سیانوتوکسین‌ها به‌عنوان مکمل‌ها می‌تواند به یک مشکل جدی تبدیل شود. مطالعه‌ای که توسط محققان انجام شد نشان می‌دهد که ۷۲ درصد از محصولات مبتنی بر سیانوباکتری‌ها دارای سطوح میکروسیستین بالاتر از حد نرمال بودند. مصرف سیانوباکتری‌هایی مانند اسپیرولینا، نوستوک و آفانیزومنون فلوس آکوئه توسط انسان می‌تواند به دلیل محتوای پروتئین بالایان باشد. استفاده از مکمل‌های سیانوباکتری‌ها منجر به سم‌زدایی، بهبود خلق‌وخو و افزایش انرژی، کاهش وزن و افزایش هوشیاری هست و درنهایت منجر به فروش آن‌ها در بسیاری از کشورهای صنعتی می‌شود. مکمل‌ها به اشکال مختلف (قرص، کپسول و پودر) به فروش می‌رسند و افراد می‌توانند بدون مشورت و تجویز پزشک از آن‌ها استفاده کنند؛ بنابراین مکمل‌ها برای مصرف بی‌خطر در نظر گرفته می‌شوند و بنابراین، می‌توانند در دوزهای بالا برای مدت طولانی مصرف شوند. بااین‌وجود، این محصولات می‌توانند عوارض جانبی منفی مانند استفراغ، اسهال و حالت تهوع داشته باشند (Gumbo *et al*., 2022; Miller *et al*., 2018).

-اقدامات لازم برای کاهش مواجهه انسان با سیانوتوکسین‌ها

در حال حاضر چندین روش برای رفع آلودگی سیانوتوکسین‌ها در مواد غذایی موجود است. روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی برای درمان سیانوتوکسین‌ها در زیر بررسی و مقایسه می‌شوند:

-درمان‌های فیزیکی

یک روش مدرن ضدعفونی آب، تخریب با نور فرابنفش است که به‌طور جامع موردمطالعه قرارگرفته است. دوزهای کافی تابش اشعه ماوراءبنفش می‌تواند میکروسیستین‌ها، سیلندراسپرموپسین و آناتوکسین را کاهش دهد. طول‌موج، دوزUV ، کدورت، وجود مواد آلی و کاتالیزورهای شیمیایی اضافی (دی‌اکسید تیتانیوم و پراکسید هیدروژن) به‌شدت براثر UV تأثیر می‌گذارد. رایج‌ترین و مؤثرترین شکل UV برای آلودگی‌زدایی آب یا غذا UV-C (طول‌موج ۲۵۴ نانومتر) بود، اما UV در

۴۰۰-۳۰۰ نانومتر نیز اثرات تخریبی دارد. مقدار بیشتر تابش اشعه ماوراءبنفش می‌تواند با افزایش شدت اشعه ماوراءبنفش یا افزایش زمان قرار گرفتن در معرض، به‌طور قابل‌توجهی میزان تخریب را افزایش دهد. کدورت آب می‌تواند از تخریب سیانوتوکسین در طول‌موج‌های بالاتر جلوگیری کند و ذرات معلق و وجود مقادیر زیادی ماده آلی در آب باعث کاهش اشعه ماوراءبنفش می‌شود (Gumbo *et al*., 2022;de la Cruz *et al*., 2013; Hu *et al*., 2016; Ma *et al*., 2014).

-اکسیدان‌های شیمیایی

گندزدایی با استفاده از کلر به‌طور گسترده‌ای در تصفیه‌خانه‌های آب مورداستفاده قرارگرفته است. وجود سلول‌های جلبکی می‌تواند محصولات جانبی مضری مانند تری هالومتان‌ها را در طول کلرزنی تشکیل دهند. اثربخشی کلرزنی در تجزیه سیانوتوکسین‌ها تحت تأثیر دوز کلر، pH و نوع سیانوتوکسین‌ها و مواد آلی موجود در آب است (Abbà *et al*., Gumbo *et al*., 2022; 2017).

مطالعات قبلی نشان داد که ۲۵ میلی‌گرم کلر برای اکسیداسیون میکروسیستین جهت برآوردن نیاز استانداردهای آب‌های آشامیدنی WHO (World Health Organization) (۰/۱ میکروگرم در لیتر) مورد لازم است، زیرا آنالوگ‌های مختلف میکروسیستین، نرخ‌های تخریب متفاوتی را تحت قرار گرفتن در معرض میزان یکسان کلر نشان می‌دهند. دوزهای کمتر کلر برای اکسیداسیون سیلندراسپرموپسین مناسب بود؛ اما آناتوکسین a در برابر اکسیداسیون کلر مقاوم است. سرعت تخریب می‌تواند تحت تأثیر pH هم باشد. کلر برای میکروسیستین‌ها در مقادیر pH کمتر از ۸ مؤثر است، درحالی‌که pH بهینه برای تخریب سیلندراسپرموپسین ۷ بود (Gumbo *et al*., 2022 ; Robinson *et al*., 2019).

یک روش جدید ضدعفونی برای تصفیه آب، ازن است که در حال حاضر استفاده می‌شود و بر تولید رادیکال‌های هیدروکسیل به‌عنوان مکانیزمی برای رفع آلودگی سیانوتوکسین‌ها از طریق تخریب ساختار شیمیایی سیانوتوکسین‌ها متکی است (Gumbo *et al*., 2022 ; Jia *et al*.m 2016).

-استانداردهای کیفیت آب‌های آشامیدنی

همان‌طور که در جدول (۴) نشان داده‌شده است، دستورالعمل‌های مختلفی توسط کشورهای مختلف جهت استانداردهای کیفیت آب‌های آشامیدنی ارائه‌شده است. وزارت امور آب (DWAF) (Drunking water and sanitation) در افریقای جنوبی محدودیت ۲۰۰۰ سلول میکروسیستین در میلی‌لیتر را در آب آشامیدنی برای حیوانات توصیه می‌کند. این مقدار استاندارد برای میکروسیستین‌های موجود در آب حاوی سلول‌های سیانوباکتری‌ها، قابل‌اجرا است (Gumbo *et al*., 2022).

جدول (۴) مقادیر مجاز سیانوتوکسین‌ها در آب‌های آشامیدنی در کشورهای مختلف (Carmichael and Boyer, 2016 ; Gumbo *et al*., 2022).

کشور	سیانوتوکسین‌ها	مقدار مجاز
برزیل، چین، جمهوری چک، دانمارک، فنلاند، فرانسه، آلمان، ایتالیا، ژاپن، کره، هلند، نروژ، نیوزلند لهستان، آفریقای جنوبی، اسپانیا	Microcystin-LR	۱/۰µg/L
کانادا	Microcystin-LR	۱/۵ µg/L
	Anatoxin-a	۳/۷ µg/L
ایالات‌متحده	Microcystin-LR	۰/۳ میکروگرم در لیتر برای ۰-۶ سال؛۱/۶ میکروگرم در لیتر برای سن مدرسه تا بزرگ‌سال
	سیلندراسپرموپسین	۰/۷ میکروگرم در لیتر برای ۰-۶ سال؛ ۳ میکروگرم در لیتر برای سن مدرسه تا بزرگ‌سال
برزیل	سیلندراسپرموپسین	۱۵µg/L
	ساکسی توکسین‌ها	۳µg/L

بحث و نتیجه‌گیری

تجمع زیستی سیانوتوکسین‌ها در غذا می‌تواند باعث بلع غلظت زیادی از سیانوتوکسین‌ها شود. وجود سیانوتوکسین‌ها در ظروف آب در غلظت بالا بر سلامتی اثر بدی داشته باشد. این سیانوتوکسین‌ها بسته به غلظت در محیط آبی می‌توانند مسمومیت‌های شدید ایجاد کنند و منجر به بیماری‌های مزمن مانند سرطان و حتی مرگ انسان‌ها و حیوانات شوند. شکوفه‌های سیانوباکتری‌ها در آب‌های شیرین که به‌عنوان منابع آب آشامیدنی، مزارع آبی و اهداف کشاورزی استفاده می‌شوند، به‌عنوان یک مشکل بهداشت عمومی و زیست‌محیطی جهانی همواره شناخته‌شده‌اند. هرگونه تماس با سد، رودخانه یا آب دریای آلوده به سیانوباکتری‌ها می‌تواند مسیر دیگری برای قرار گرفتن انسان در معرض سیانوتوکسین‌ها باشد. قرار گرفتن مکرر در معرض غلظت‌های پایین سیانوتوکسین‌ها در آب‌های آشامیدنی تصفیه‌شده نیز می‌تواند نتیجه شکست در حذف مؤثر سیانوتوکسین‌ها در طول فرآیندهای تصفیه آب معمولی باشد. این مقاله مروری نشان می‌دهد که باید تحقیقات بیشتری درزمینه آلودگی‌های آب و غذا با سیانوباکتری‌ها/سیانوتوکسین‌ها انجام شود. علاوه بر آن باید کارهای تحقیقاتی بیشتری باید بر روی ترکیب بیوفیلم یا سموم موجود در ظروف ذخیره آب انجام گردد. به این منظور استفاده از ظروف تیره به‌جای ظروف روشن توصیه می‌شود زیرا ظروف تیره می‌توانند تکثیر یا رشد سیانوباکتری‌ها را در آب ذخیره‌شده، محدود کنند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی برای اعلام ندارند.

منابع

- Ahari, H., Nowruzi, B., Anvar A.A. and Porzani, S. (2022). The toxicity testing of cyanobacterial toxins in vivo and in vitro by mouse bioassay: A review. Mini Reviews in Medicinal Chemistry, 22(8): 1131-1151.
- Al-Thawadi, S. (2018). Public perception of algal consumption as an alternative food in the Kingdom of Bahrain. Arab Journal of Basic and Applied Sciences, 25(1): 1-12.
- Bradley, W., Miller, G., Levine, T., Stommel, E. and Cox, P. (2018). Studies of environmental risk factors in amyotrophic lateral sclerosis (ALS) and a phase I clinical trial of L-serine. Neurotoxicity research, 33(1): 192-198.
- Carmichael, W. and Boyer, L. (2016). Health impacts from cyanobacteria harmful algae blooms: Implications for the North American Great Lakes. Harmful algae, 54(5): 194-212.
- Collivignarelli, M., Abbà, A., Benigna, S., Sorlini, S. and Torretta, V. (2017). Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants. Sustainability, 10(1): 86-95.
- Dalu, T. and Wasserman, R. (2018). Cyanobacteria dynamics in a small tropical reservoir: Understanding spatio-temporal variability and influence of environmental variables. Science of the total environment, 643(2): 835-841.
- Gobler, C., Burkholder, T., Davis, M., Harke, T. and Van de Waal, D. (2016). The dual role of nitrogen supply in controlling the growth and toxicity of cyanobacterial blooms. Harmful algae, 54(1): 87-97.
- Greer, B., Meneely, J. and Elliott, C. (2018). Uptake and accumulation of Microcystin-LR based on exposure through drinking water: An animal model assessing the human health risk. Scientific reports, 8(1): 4913-4923.
- He, X., de la Cruz, A. and Dionysiou, D. (2013). Destruction of cyanobacterial toxin cylindrospermopsin by hydroxyl radicals and sulfate radicals using UV-254 nm activation of hydrogen peroxide, persulfate and peroxymonosulfate. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 251(3): 160-166.
- Hollister, J. and Kreakie, B. (2016). Associations between chlorophyll a and various microcystin health advisory concentrations. Zenodo, 3(2): 15-28.
- Kubickova, B., Babica, K., Hilscherová, P. and Šindlerová, L. (2019). Effects of cyanobacterial toxins on the human gastrointestinal tract and the mucosal innate immune system. Environmental Sciences Europe, 31(1): 1-27.
- Lee, S. and Jiang, X. (2017). Cyanobacterial toxins in freshwater and food: important sources of exposure to humans. Annual review of food science and technology, 8(2): 281-304.
- Liu, S., Xu H., Wu, H. and Ma, F. (2016). Degradation of Microcystins from Microcystis aeruginosa by 185-nm UV Irradiation. Water, Air, & Soil Pollution, 227(3): 1-5.

- McLellan, N. and Manderville, R. (2017). Toxic mechanisms of microcystins in mammals. Toxicology research, 6(4): 391-405.
- Mutoti, M., Gumbo, J. and Jideani, I. (2022). Occurrence of cyanobacteria in water used for food production: A review. Physics and Chemistry of the Earth, 3(2): 13-23.
- Nowruzi, B. (2023). Cyanobacteria are a rich source of anticancer drugs. New Approaches in Cellular and Molecular Sciences, 12(2): 19-28.
- Nowruzi, B. and Becerra-Absalón, I. (2022). A Novel Potentially Toxic Cyanobacterial Species From the Genus Desmonostoc, Desmonostoc Alborizicum sp. nov., Iisolated From a Water Supply System of IranA. Current Microbiology, 80(1):49-59.
- Nowruzi, B., Hutárová, L., Absalón, B. and Liu, L. (2022). A new strain of Neowestiellopsis (Hapalosiphonaceae): first observation of toxic soil cyanobacteria from agricultural fields in Iran. BMC microbiology, 22(1): 1-13.
- Nowruzi, B., Jalil, B. and Metcalf, J. (2023). Antifungal screening of selenium nanoparticles biosynthesized by microcystin-producing Desmonostoc alborizicum. BMC biotechnology, 23(1): 41-53.
- Nowruzi, B. and S. J. Porzani (2021). Toxic compounds produced by cyanobacteria belonging to several species of the order Nostocales: A review. Journal of Applied Toxicology, 41(4): 510-548.
- Pham, T. and Utsumi, M. (2018). An overview of the accumulation of microcystins in aquatic ecosystems. Journal of environmental management, 213 (3): 520-534.
- Porzani, S., Lima, S., Metcalf, J. and Nowruzi, B. (2021). In vivo and in vitro toxicity testing of cyanobacterial toxins: A mini-review. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 258 (4): 109-150.
- Sabzevari, O., Khajerahimi, A., Kazempoor, R. and Nowruzi, B. (2022). A review of the antimicrobial and toxic properties of nanoparticles as a new alternative in the control of aquatic diseases. Sustainable Aquaculture and Health Management Journal, 8(1): 78-102.
- Trung, B., Faassen, E. and Lürling, M. (2018). Cyanobacterial blooms and microcystins in Southern Vietnam. Toxins, 10(11): 471-489.
- Wang, S., Fang, Y. and Huang, Y. (2014). Bismuth oxybromide promoted detoxification of cylindrospermopsin under UV and visible light illumination. Applied Catalysis B: Environmental, 150(2): 380-388.
- Wati, S., Robinson, B., Blackbeard, J. and Keegan, A. (2019). Chlorine inactivation of coxsackievirus B5 in recycled water destined for non-potable reuse. Journal of Water and Health, 17(1): 124-136.
- Wood, R. (2016). Acute animal and human poisonings from cyanotoxin exposure—A review of the literature. Environment International, 91(4): 276-282.
- Yan, S., Jia, A. and Song, W. (2016). Ozonation of cylindrospermopsin (cyanotoxin): degradation mechanisms and cytotoxicity assessments. Environmental science & technology, 50(3): 1437-1446.