



شرکت آب و فاضلاب استان کردستان



دانشگاه علوم پزشکی کردستان

گزارش طرح تحقیقاتی

عنوان:

بررسی غلظت متابولیت های جلبکی شبکه توزیع آب شرب

شهر سنندج و ارزیابی خطرات بالقوه بهداشتی آن در

سال ۱۴۰۳

مجری طرح:

دکتر رضا رضایی

عضو هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی کردستان

دی ماه ۱۴۰۴

چکیده

مقدمه: در سالهای اخیر شکوفایی جلبکی به دلیل تغییرات اقلیمی و تغذیه گرایی مخازن آب های سطحی، به عنوان پدیده چالشی نوظهور به ویژه برای کشورهای که به منابع آب های سطحی وابسته اند، تبدیل گردیده است. متابولیت های تولید شده توسط جلبک ها و سیانوباکتری ها، نه تنها بر گوارایی و کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب تأثیر می گذارند، بلکه مهم تر از آن، ممکن است مواد سمی ثانویه ای به نام سیانوتوکسین ها (Cyanotoxins) را به محیط آزاد نمایند که در طولانی مدت خطرات جدی برای سلامت انسان به دنبال دارند.

هدف از انجام این مطالعه تعیین غلظت متابولیت های جلبکی آب شرب شهر سنندج شامل ژئوزمین، 2-MIB و میکروسیستین LR و ارزیابی خطر سرطان زایی و غیر سرطان زایی منتسب به میکروسیستین LR به عنوان شاخص سموم جلبکی بوده است.

روش کار: در این مطالعه نمونه برداری از ۱۱ نقطه شامل آب ورودی و خروجی تصفیه خانه های شهر سنندج و روستای قلیان و همچنین نقاط مختلف شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج و روستای قلیان در چهار فصل مختلف در طی یک سال انجام شد. بر این اساس آنالیز میکروسیستین LR، با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) با دتکتور UV-vis، ترکیبات ژئوزمین و ۲ - متیل ایزبورنئول با استفاده از دستگاه گاز کروماتوگراف طیف سنج جرمی (GC-MS) انجام شد. همچنین فلزات سنگین شاخص مطابق اهداف طرح با استفاده از دستگاه طیف سنجی نشر نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) مدل Thermo Scientific Pro-XP ICP-OES Due تعیین مقدار گردید. سایر پارامترهای تعریف شده در این طرح مطابق آخرین ویرایش دستورالعمل مندرج در کتاب استاندارد متد جهت انجام آزمایشهای آب و فاضلاب آنالیز گردیدند. به علاوه در این مطالعه جهت ارزیابی خطر سم میکروسیستین LR به عنوان شاخص سموم جلبکی بر روی بزرگسالان و کودکان، از مدل ارزیابی خطر سلامتی سازمان محیط زیست ایالات متحده (USEPA) استفاده شد.

نتایج: نتایج حاصل از آنالیز پارامترهای متداول کیفی آب شامل pH، کلر باقیمانده، کدورت، شاخص UV254، نیترات، کل کربن آلی (TOC)، کلروفیل آ و طعم و بو در شبکه شرب آب شهر سنندج و روستای قلیان در فصول مختلف نشان داد مقادیر در محدوده استاندارد ملی قرار دارند. هرچند برخی پارامترها از جمله کلر باقیمانده، کدورت و طعم و بو نیاز به پایش بیشتری دارند. نتایج حاصل از آنالیز فلزات سنگین شاخص از جمله مس، روی، منگنز، سرب، کادمیم، کروم و آرسنیک نشان می دهد، مقادیر همه نمونه ها در همه فصول کمتر از حد استاندارد ملی و در محدوده مجاز قرار دارند. در خصوص غلظت آهن، در اکثر نقاط در شبکه و در فصول مختلف کمتر از حد مجاز است ولی در برخی ایستگاهها بویژه در فصل پاییز مقدار آن بالاتر از حد مجاز تعیین گردیده است. دلیل این امر میتواند به نوع منعقد کننده مورد استفاده در تصفیه خانه مرتبط باشد.

همچنین در خصوص متابولیت جلبکی همانطوریکه مشهود است کمترین غلظت میکروسیستین LR در اغلب نقاط شبکه آب سنندج غیر قابل تشخیص و در حد صفر و بیشترین غلظت این پارامتر در شبکه توزیع آب روستای قلیان ۰/۶۵ ppb تعیین گردیده است. بر این اساس در هیچ یک از نقاط شبکه در فصول مختلف، غلظت میکروسیستین LR از حد مجاز استاندارد ملی ($1\mu\text{g/L}$) بیشتر نشده است. در خصوص متابولیت های ژئوزمین و 2-MIB در اغلب نقاط

شبکه سنندج غیر قابل تشخیص و در حد صفر و بیشترین مقدار آنها به ترتیب در شبکه توزیع آب روستای قلیان برابر با ۲/۵ و ۳/۷ ng/l تعیین گردیده است.

نتایج حاصل از این مطالعه در خصوص ارزیابی ریسک غیرسرطان‌زایی میکروسیستین LR نشان داد، تمام مقادیر HQ > 1 برای بزرگسالان و کودکان بوده که نشان‌دهنده عدم بروز اثرات غیر سرطان‌زا است. همچنین در ارتباط با ارزیابی اثرات سرطان‌زایی این سم نتایج نشان داد همه مقادیر ELCR بین 10^{-6} تا 10^{-5} هستند که در محدوده قابل قبول و مدیریتی ($ELCR \leq 10^{-4}$) قرار دارند.

نتیجه گیری: در مجموع اتخاذ راهبردهای مدیریتی پیشگیرانه از جمله پایش مداوم منابع آب از حوزه آبریز تا مصرف کننده، بازبینی و اجرای صحیح برنامه ایمنی آب آشامیدنی و در نهایت بهبود فرآیندهای تصفیه، می‌تواند ایمنی و کیفیت آب شرب شهر سنندج را تضمین نماید.

کلیدواژه‌ها: سیانوباکتر، میکروسیستین LR، ژئوسمین، 2-MIB، ارزیابی ریسک بهداشتی، آب شرب

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: کلیات	
۱-۱- مقدمه.....	۱۰
۲-۱- ضرورت اجرای مطالعه.....	۱۰
۳-۱- اهداف پژوهش.....	۱۳
۳-۱-۱- هدف اصلی.....	۱۳
۳-۱-۲- اهداف اختصاصی.....	۱۳
۴-۱- هدف کاربردی.....	۱۴
۵-۱- فرضیات یا سوالات پژوهش.....	۱۴
۶-۱- جلبکها در منابع آب.....	۱۵
۷-۱- متابولیت‌های جلبکی.....	۱۵
۸-۱- سیانوباکترها و سیانوتوکسین‌ها.....	۱۶
۹-۱- دلایل شکوفایی جلبکی.....	۱۷
۱۰-۱- اثرات بهداشتی ناشی از مواجهه با سیانوتوکسین‌ها.....	۱۷
۱۱-۱- سم‌شناسی سیانوتوکسین‌ها.....	۱۹
۱۲-۱- سرطانزایی سیانوتوکسین‌ها.....	۲۰
۱۳-۱- پایداری سیانوتوکسین‌ها.....	۲۰
۱۴-۱- روش‌های آنالیز.....	۲۰

-
- ۱۵-۱- استانداردها و دستورالعملهای ملی و جهانی مرتبط ۲۲
- ۱۶-۱- تصفیه سیانوکسین ها و مدیریت شکوفایی سیانوباکتریایی ۲۲
- ۱۶-۱-۱- حذف سیانوتوکسین درون سلولی ۲۳
- ۱۶-۱-۲- حذف فیزیکی سیانوتوکسین های برون سلولی ۲۴
- ۱۶-۱-۳- اکسیداسیون سیانوتوکسین های برون سلولی ۲۵
- ۱۷-۱- ارزیابی ریسک بهداشتی ۲۵
- ۱۷-۱-۱- ارزیابی خطر غیر سرطانزایی ۲۶
- ۱۷-۱-۲- ارزیابی خطر سرطان زایی ۲۷
- ۱۸-۱- سابقه طرح و بررسی متون ۲۷

فصل دوم: روش کار

- ۱-۲- معیارهای ورد به مطالعه ۲۹
- ۲-۲- معیارهای خروج از مطالعه ۲۹
- ۳-۲- حجم نمونه ۲۹
- ۴-۲- روش نمونه برداری و آنالیز نمونه ها ۳۰
- ۵-۲- محاسبات ارزیابی ریسک بهداشتی ۳۱

فصل سوم: نتایج و یافته ها

- ۱-۳- pH ۳۸
- ۲-۳- کلر باقیمانده ۳۸
- ۳-۳- کدورت ۳۹

۴۰	۴-۳- شاخص UV254
۴۱	۵-۳- نیترات
۴۲	۶-۳- مس
۴۳	۷-۳- روی
۴۴	۸-۳- آهن
۴۵	۹-۳- منگنز
۴۶	۱۰-۳- سرب
۴۷	۱۱-۳- کادمیم
۴۸	۱۲-۳- کروم
۴۹	۱۳-۳- آرسنیک
۵۰	۱۴-۳- میکروسیستین LR
۵۱	۱۵-۳- ژئوزمین و 2-MIB
۵۳	۱۶-۳- TOC
۵۳	۱۷-۳- کلروفیل آ
۵۴	۱۸-۳- طعم و بو
۵۵	۱۹-۳- ارزیابی ریسک بهداشتی

فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیامدهای اصلی مطالعه

۶۰	۱-۴- نتیجه‌گیری
۶۱	۲-۴- پیامدهای حاصل از مطالعه

۳-۴- پیشنهادات کاربردی و مدیریتی ۶۲

فهرست منابع..... ۶۵

پیوست ها- آنالیز متابولیت های جلبکی

فهرست جداول

عنوان جدول صفحه

۱- سیانوباکتری های پلانکتونی آب شیرین تولید کننده سموم ۱۷

۲- سیانوباکترهای متداول تولید کننده سم و اثرات بهداشتی آنها ۱۸

۳- روش های آنالیز سیانوتوکسین ها در آب های شیرین ۲۱

۴- فرآیندهای تصفیه سیانوتوکسین ها و کارایی آنها ۲۶

۵- کد ایستگاههای نمونه برداری آب و آدرس ۳۰

۶- نتایج آزمایشات مرحله اول ۳۴

۷- نتایج آزمایشات مرحله دوم ۳۵

۸- نتایج آزمایشات مرحله سوم ۳۶

۹- نتایج آزمایشات مرحله چهارم ۳۷

۱۰- نتایج و میانگین غلظت میکروسیستین LR آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف ۵۷

۱۱- داده های مورد نیاز جهت محاسبات ارزیابی ریسک غیر سرطانزایی و سرطانزایی ۵۷

۱۲- ارزیابی ریسک غیر سرطانزایی سم میکروسیستین LR در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف ... ۵۸

- ۱۳- ارزیابی ریسک سرطانزایی سم میکروسیستین LR در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف..... ۵۹
- ۱۴- جمع بندی و مقایسه نهایی ارزیابی ریسک سرطانزایی سم میکروسیستین LR در آب شرب شهر سنندج..... ۶۰

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل	صفحه
۱- محاسبه حجم نمونه بر اساس شاخص HQ.....	۳۰
۲- نتایج آزمایش pH آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۳۸
۳- نتایج آزمایش کلر باقیمانده آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۳۹
۴- نتایج آزمایش کدورت آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۴۰
۵- نتایج آزمایش شاخص UV254 آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۴۰
۶- نتایج آزمایش نیتрат آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۴۱
۷- نتایج آزمایشات غلظت مس آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۴۲
۸- نتایج آزمایشات غلظت روی آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۴۳
۹- نتایج آزمایشات غلظت آهن آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۴۴
۱۰- نتایج آزمایشات غلظت منگنز آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۴۵
۱۱- نتایج آزمایشات غلظت سرب آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۴۶
۱۲- نتایج آزمایشات غلظت کادمیم آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۴۷
۱۳- نتایج آزمایشات غلظت کروم آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۴۸
۱۴- نتایج آزمایشات غلظت آرسنیک آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۴۹

۱۵- نتایج آزمایشات غلظت میکروسیستین LR آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۵۱
۱۶- نتایج آزمایشات غلظت متابولیت جلبکی ژئوزمین آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۵۲
۱۷- نتایج آزمایشات غلظت متابولیت جلبکی MIB-۲ آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۵۲
۱۸- نتایج آزمایشات غلظت TOC آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۵۳
۱۹- نتایج آزمایشات کلروفیل آ آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۵۴
۲۰- نتایج آزمایشات طعم و بوی آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف.....	۵۵

۱- فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه

دسترسی به آب شرب سالم و کافی یکی از اساسی‌ترین الزامات بهداشتی و از مهم‌ترین شاخص‌های توسعه پایدار در سطح ملی و منطقه‌ای محسوب می‌شود. کیفیت آب شرب نه تنها مستقیماً بر سلامت عمومی تأثیر می‌گذارد، بلکه نقش حیاتی در ثبات اقتصادی، اجتماعی و رفاه جوامع ایفا می‌نماید [۱]. شبکه‌های توزیع آب شرب در معرض تهدیدات آلودگی‌های مختلفی قرار دارند که از منابع طبیعی، فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای ذخیره و نگهداری ناشی می‌شوند. آلودگی‌های سنتی شامل آلودگی‌های میکروبی (مانند باکتری‌ها و ویروس‌ها) و آلودگی‌های شیمیایی (مانند فلزات سنگین، نیتрат و سموم کشاورزی) همواره کانون توجه سازمان‌های متولی آب بوده‌اند. با این حال، پیشرفت‌های اخیر در روش‌های آنالیز، منجر به شناسایی دسته جدیدی از آلاینده‌ها شده که به عنوان "آلاینده‌های نوظهور (Emerging Contaminants)" شناخته می‌شوند. در میان این آلاینده‌های نوظهور، متابولیت‌های تولید شده توسط جلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها (جلبک‌های سبز-آبی) اهمیت ویژه‌ای دارند. این موجودات، که معمولاً در منابع آب سطحی (مانند مخازن سدها) رشد می‌کنند، در شرایط مساعد محیطی (سکون، افزایش دما، غنی‌سازی مواد مغذی مانند فسفر و نیتروژن) می‌توانند تکثیر بی‌رویه داشته باشند که به پدیده "شکوفایی جلبکی (Algal Blooms)" معروف است. این شکوفایی‌ها نه تنها بر کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب تأثیر می‌گذارند (مانند تغییر طعم و بو)، بلکه مهم‌تر از آن، مواد سمی ثانویه‌ای به نام سیانوتوکسین‌ها (Cyanotoxins) را به محیط آزاد می‌کنند که در طولانی مدت خطرات جدی برای سلامت انسان را به دنبال دارند [۱، ۲].

۱-۲- ضرورت اجرای مطالعه

بسیاری از مشکلات بهداشتی کشورهای در حال توسعه، عدم برخورداری از آب آشامیدنی سالم می‌باشد. از آنجاییکه محور توسعه پایدار، انسان سالم است و سلامت انسان در گرو بهره‌مندی از آب آشامیدنی مطلوب می‌باشد، بدون تامین آب سالم تضمینی برای سلامت و رفاه جامعه وجود ندارد [۳]. آگاهی از آلاینده‌های آب، مسیر مواجهه و اثرات بهداشتی ناشی از ورود و حضور آنها در منابع آب شرب جهت کاهش بار بیماری‌ها منتسب به آب حائز اهمیت است و بدون پایش و برآورد خطر نسبی این آلاینده‌ها به راحتی نمی‌توان در خصوص کیفیت آب اظهار نظر نمود [۱]. از جمله آلاینده‌های آب متابولیت‌های جلبکی می‌باشند که علاوه بر ایجاد طعم و بو می‌توانند باعث سمیت آب گردند. جلبک‌ها را با توجه به ویژگی رنگ آنها به چهار رده، سبز-آبی، سبز، قهوه‌ای و قرمز تقسیم می‌کنند. رایج‌ترین گروه جلبک‌ها، جلبک‌های سبز

آبی یا سیانوباکترها هستند که وجود آنها در مخازن سدها، دریاچه ها و رودخانه‌هایی که به عنوان منابع آب آشامیدنی استفاده می‌شوند یک مسئله بهداشت آب در سراسر دنیا محسوب می‌گردد [۴].

سیانوباکتریها موجودات زنده میکروسکوپی و تک سلولی هستند. این باکتری‌ها که توانایی فتوسنتز دارند، می‌توانند کیفیت آب‌های آشامیدنی را در فصولی از سال که دمای آب افزایش و سطح آب کاهش می‌یابد، تغییر دهند و اغلب منجر به شکایاتی از طرف مصرف کنندگان آب آشامیدنی شوند. این در حالی است که این شکایات نه به دلیل سموم خطرناک بلکه به دلیل ایجاد بو و مزه نامطبوع می‌باشد، چرا که آستانه احساس چنین بویی توسط انسان بسیار پایین و در حد ۴ تا ۱۰ نانوگرم در هر لیتر آب است. این بو و مزه ناشی از ترکیباتی مانند ژئوسمین (Geosmin) و ۲-م-متیل ایزبورنئول (2-methylisoborneol) یا (2-MIB) هستند که توسط جلبک‌های سبز-آبی تولید می‌شوند و یا در نتیجه‌ی مرگ این جلبک‌ها در خلال فرآیند تصفیه آب ایجاد می‌گردند. سیانوباکترها سمومی مانند میکروسیستین‌ها، ساکسیتوکسین، آناتوکسین و غیره را تولید می‌کنند که دارای سمیت عمدتاً مزمن برای انسان می‌باشند. میزان ترشح متابولیت و سموم جلبکی تحت تاثیر عوامل مختلفی مثل تغییرات دما در فصول مختلف، حرکت و یا سکون سطوح آب، حضور سایر آلاینده‌ها مثل فلزات سنگین و نوع جلبک‌ها دارد. بطوریکه در دماهای بالای آب و راکد و بی حرکت بودن آن ترشح متابولیت‌های جلبکی حداکثر است. در حضور برخی فلزات سنگین مثل کادمیوم و جیوه ممکن است فتوسنتز جلبک‌ها دچار اختلال شده و به دنبال آن ترشح متابولیت نیز کاهش یابد و یا حضور برخی از فلزات سنگین مثل آهن، منگنز و روی باعث تحریک رشد جلبک و بدنبال آن باعث افزایش متابولیت جلبکی شوند، لذا اطلاع از وضعیت فلزات سنگین در منابع آبی می‌تواند در تحلیل تولید متابولیت‌های جلبکی موثر باشد [۱، ۵، ۶].

سم میکروسیستین LR (*Microcystin-LR*) یکی از انواع سیانوتوکسین‌های تولید شده ناشی از فعالیت و تخریب جلبک-های سبز-آبی (سیانوباکترها) می‌باشد. این سم متداول‌ترین و سمی‌ترین ترکیب از گروه میکروسیستین‌های هپاتوتوکسیک بوده و در اغلب مطالعات مرتبط با تصفیه آب بعنوان شاخص مطرح می‌باشد. حداکثر مقدار مجاز این سم در منابع آب شرب برابر رهنمود سازمان جهانی بهداشت و استاندارد ۱۰۵۳ کشور، برابر یک میکروگرم بر لیتر تعیین گردیده است. سموم سیانوتوکسین فوق‌الذکر به همراه ترکیبات مولد بو با همدیگر همزمان وجود دارند. بر اساس مطالعات معتبر با وجود اینکه ترکیبات مولد بو در غلظت‌های پایین یعنی در شرایطی که بو و مزه آب را تغییر می‌دهند فاقد اثرات زیانبار بر روی سلامتی هستند، سموم سیانوتوکسین به ویژه میکروسیستین که یک هپاتوتوکسین است، دارای اثرات مخرب بر سلامتی انسان هستند [۱]. به این دلیل که ترکیبات مولد بو و مزه همیشه همراه با سیانوتوکسین‌ها وجود دارند، مراکز تهیه آب آشامیدنی در فصول شکوفایی جلبکی بایستی مقادیر سموم سیانوتوکسین را پایش کنند. بنابراین اگرچه

بوی خاکی یا ماندگی (کپکی) آب منجر به کاهش زیبایی شناختی آب می‌شود، اما معیار مناسبی برای بررسی سلامت آب نیست. چرا که این احتمال که سموم سیانوتوکسین همراه با ترکیبات مولد بو و مزه وجود داشته باشند بسیار بالا است. حتی در برخی مطالعات این سموم متناوباً بیشتر از ترکیبات مولد بو و مزه در آب یافت شده‌اند، بنابراین بو و مزه به تنهایی (بدون پایش سموم) هشدار کافی برای محافظت انسان در برابر این سموم محسوب نمی‌گردد [۷، ۸].

اثرات مواجهه با سیانوتوکسین‌ها در انسان عمدتاً به مطالعات اپیدمیولوژیکی برمی‌گردند که در چند اپیدمی در طول قرن گذشته اتفاق افتاده‌اند. علایم از گاستروانتریت، درد شکمی، علایم شبه آنفلوآنزا، تحریک و قرمزی گوش و چشم تا آسیب به کبد و کلیه گزارش گردیده است. به طور کلی اثرات این سیانوتوکسین‌ها را می‌توان به اثر بروی کبد (هپاتوتوکسین‌ها)، اثر بروی سیستم عصبی (نوروتوکسین‌ها) و اثر بر روی پوست (درماتوتوکسین‌ها) دسته بندی نمود. اگر چه اثر این سموم بر روی سیستم خونی، قلبی-عروقی، گوارشی، تولید مثلی و کلیوی در گزارشات متعدد آمده است [۹]. همچنین اثرات بهداشتی مواجهه با میکروسیستین‌ها در اثر مصرف آبهای حاوی سیانوباکترهای تولیدکننده میکروسیستین‌ها در گزارشات متعددی بررسی شده است. دامنه این اثرات از افزایش میزان آنزیمهای کبدی موجود در پلاسما [۹، ۱۰] تا گاستروانتریت [۱۱] و حتی مرگ [۱۲] می‌باشد. آژانس بین المللی تحقیقات سرطان (IARC) با مرور مطالعات اپیدمیولوژیک، افزایش سرطانهای کبد و روده بزرگ را در افرادی که در مناطق با آبهای سطحی دارای گونه‌های میکروسیستیس (و سموم دیگر) نسبت به افراد مناطق دارای آبهای سطحی سالم گزارش نموده است [۱۳]. از نظر اثرات سرطانزایی، آژانس بین المللی تحقیقات سرطان میکروسیستین-LR را به عنوان یک ماده گروه 2B (احتمالاً سرطانزا) طبقه‌بندی نموده است. میکروسیستین‌ها شدیداً پایدار و مقاوم به تجزیه شیمیایی هستند و به همین دلیل این سموم با جوشاندن آب از بین نمی‌روند [۱، ۲].

اثرات بهداشتی مورد انتظار متابولیت‌های جلبکی را می‌توان از طریق ارزیابی خطر بهداشتی بیان نمود. ارزیابی خطر یک چارچوب مفهومی است که مکانیسمی را برای بررسی اطلاعات مرتبط با تخمین پیامدهای بهداشتی و زیست‌محیطی فراهم می‌نماید. ارزیابی خطر را می‌توان به عنوانی فرآیندی در جهت برآورد احتمالات ایجاد اثرات مضر سلامتی به واسطه مواجهه با آلاینده شیمیایی محیطی در زمان‌های مختلف تعریف نمود. در بیان جامع تر مطابق تعریف سازمان جهانی بهداشت و برنامه بین‌المللی ایمنی مواد شیمیایی ارزیابی خطر به فرآیندی اطلاق می‌گردد که با هدف محاسبه یا برآورد خطر موجود برای یک ارگانیسم، سیستم یا جمعیت به کار می‌رود. ارزیابی خطر سلامت به کار گرفته شده به منظور تجزیه و تحلیل کیفیت محیط زیست از چهار مرحله تشکیل گردیده که شامل شناسایی خطر، ارزیابی و تعیین در معرض گذاری، ارزیابی رابطه دوز واکنش و توصیف ویژگی‌های خطر می‌باشد [۱۴، ۱۵].

هر چند آب آشامیدنی تولیدی در کشور در اغلب شهرها مراحل از تصفیه را سپری می‌نماید، اما همواره نگرانی‌هایی در خصوص آلودگی منابع آب شرب کشور به آلاینده‌ها وجود دارد. آب شرب مورد استفاده در شهر سنندج با جمعیتی در حدود ۵۵۰ هزار نفر از آب‌های سطحی (قبلاً به صورت کامل از سد قشلاق و اخیراً عمدتاً از سد آزاد و در مواقع تعمیرات ایستگاه‌های پمپاژ و شرایط اضطراری از سد قشلاق و یا به صورت ترکیبی از هر دو سد) تأمین می‌گردد و از طریق تصفیه‌خانه‌ای متداول متشکل از دو فاز اجرایی (با ظرفیت اسمی ۱۴۰۰ لیتر در ثانیه) تصفیه و در مخازن سطح شهر ذخیره و در نهایت از طریق شبکه آبرسانی توزیع می‌گردد. در این میان با توجه به مسیر طولانی رودخانه‌های منتهی به مخزن سد قشلاق و آزاد و عبور آن از مناطقی با پتانسیل آلاینده‌گی بالا، بر اساس آنالیزهای انجام گرفته و گزارشات رسمی شرکت آب و فاضلاب استان شکوفایی جلبیکی در سد قشلاق اتفاق افتاده (در این خصوص مطالعه جامعی بر روی سد آزاد گزارش نگردیده است) و در نتیجه طعم و بوی نامطبوع آب (بوهای خاکی یا کپکی) عمدتاً توسط جلبک‌ها، اکتینومیست‌ها و قارچ‌ها تولید می‌شوند که نگرانی و شکایت مصرف‌کنندگان را به همراه داشته است.

لذا با توجه به اهمیت بهداشتی و مخاطرات ناشی از مواجهه مصرف‌کنندگان با متابولیت‌های جلبیکی، برآورد خطر بهداشتی این آلاینده‌ها و ارائه راهکارهای مدیریتی و کنترل خطر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از انجام این مطالعه تعیین غلظت شاخص متابولیت‌های جلبیکی آب شرب شهر سنندج شامل ژئوزمین، ۲-MIB و میکروسیستین LR و ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی منتسب به میکروسیستین LR به عنوان شاخص سموم جلبیکی بوده است.

۱-۳- اهداف پژوهش

۱-۳-۱- هدف اصلی طرح:

تعیین غلظت شاخص متابولیت‌های جلبیکی شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج و ارزیابی خطرات بالقوه بهداشتی آن در سال ۱۴۰۳

۱-۳-۲- اهداف اختصاصی طرح:

- تعیین غلظت ژئوزمین (Geosmin) در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج
- تعیین غلظت ۲- متیل ایزبورنئول (2-methylisoborneol) در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج
- تعیین غلظت پارامترهای متداول آب شرب (شامل pH، کدورت، نیترات، دما، بو، کلر باقی مانده) در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج
- تعیین غلظت فلزات سنگین شاخص و تاثیر گذار در رشد جلبیکی شامل کادمیوم-کروم-مس-روی-آهن-منگنز-آرسنیک-سرب در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج
- تعیین میزان TOC، UV254 در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج

- تعیین میزان کلرفیل آ در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج
- تعیین غلظت میکرو سیستین ال آر (Microcystin-Lr) در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج
- تعیین ریسک اضافی سرطان (ELCR) میکرو سیستین ال آر ناشی از مصرف آب شبکه توزیع شهر سنندج
- تعیین ضریب خطر (HQ) ریسک غیر سرطان زایی میکرو سیستین ال آر ناشی از مصرف آب شبکه توزیع شهر سنندج

۱-۴- اهداف کاربردی:

مطالعه‌ی حاضر با تعیین غلظت متابولیت‌های جلبکی در شبکه آب شرب شهر سنندج و مقایسه نتایج آن با استانداردهای مربوطه، اطلاعات مفیدی در اختیار خواهد گذاشت تا در صورت غلظت بالاتر از استاندارد، اقدامات موثر انجام پذیرد. همچنین در این مطالعه جهت تعیین اثرات مخرب بهداشتی غلظتهای مختلف این متابولیت‌ها، از روشهای ارزیابی ریسک استفاده خواهد شد تا از این طریق در صورت بالا بودن آن، هشدار مداخلات سریع تدوین و به اجرا درآید.

۱-۵- فرضیات یا سوالات پژوهش (باتوجه به اهداف طرح):

- میزان غلظت ژئوزمین (Geosmin) در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج چقدر است؟
- میزان غلظت ۲ م- متیل ایزبورنئول (2-methylisoborneol) در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج چقدر است؟
- میزان غلظت پارامترهای متداول آب شرب (شامل pH، کدورت، نیترات، دما، بو، کلر باقی مانده) در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج چقدر است؟
- میزان غلظت فلزات سنگین شاخص و تاثیر گذار در رشد جلبکی شامل (کادمیوم-کروم-مس-روی-آهن-منگنز-آرسنیک-سرب) در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج چقدر است؟
- میزان UV254، TOC در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج چقدر است؟
- میزان کلرفیل آ در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج چقدر است؟
- میزان غلظت میکرو سیستین ال آر (Microcystin-Lr) در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج چقدر است؟
- میزان ریسک اضافی سرطان (ELCR) میکرو سیستین ال آر ناشی از مصرف آب شبکه توزیع شهر سنندج چقدر است؟
- میزان ضریب خطر (HQ) ریسک غیر سرطان زایی میکرو سیستین ال آر ناشی از مصرف آب شبکه توزیع شهر سنندج چقدر است؟

۱-۶- جلبکها در منابع آب

جلبکها گروهی متنوع از ارگانیسمهای فتوسنتزکننده هستند که در محیطهای آبی از جمله رودخانهها، دریاچهها، سدها و حتی شبکههای توزیع آب شرب حضور دارند. رشد بی‌رویه این موجودات که به عنوان شکوفایی جلبکی (Algal Bloom) شناخته می‌شود، معمولاً ناشی از غنی‌شدن آب از عناصر مغذی (نظیر نیتروژن و فسفر)، افزایش دما و سکون جریان آب است.

افزایش دمای ناشی از تغییرات اقلیمی فرآیند لایه‌بندی حرارتی آبها را تشدید می‌کند. از سوی دیگر، مواد مغذی ناشی از فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه نیتروژن و فسفر موجود در فاضلابه‌های انسانی و زه‌هابهای کشاورزی، باعث اوتریفیکاسیون (افزایش مواد مغذی و رشد بیش از حد جلبکها) در منابع آب سطحی می‌شود. این عوامل هم‌افزا رشد بیش از حد فیتوپلانکتون‌ها را تسریع کرده و منجر به بروز شکوفایی‌های جلبکی می‌شود. این شکوفایی‌ها به‌ویژه در مخازن سدها و منابع آب شرب، باعث تولید متابولیت‌هایی می‌شوند که می‌توانند موجب افت کیفیت آب، ایجاد طعم و بوی نامطبوع، و خطرات بالقوه بهداشتی گردند [۱، ۱۶].

از نظر رده‌بندی، مهم‌ترین گروه‌های جلبکی در منابع آب شامل موارد زیر می‌باشند.

- سیانوباکترها (Cyanobacteria): قدیمی‌ترین و پراهمیت‌ترین نوع جلبک‌های آبی که با نام "جلبک‌های سبز-آبی" نیز شناخته می‌شوند. گونه‌هایی مانند *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria* و *Nostoc* از تولیدکنندگان اصلی متابولیت‌های سمی و ترکیبات طعم و بو در آب هستند.

- جلبک‌های سبز (Chlorophyta): اگرچه غالباً غیرسمی‌اند، اما در حضور مواد مغذی زیاد باعث رقابت و تشدید رشد سیانوباکتری‌ها می‌شوند.

- دیاتومه‌ها (Bacillariophyceae): معمولاً در آب‌های سرد فعال‌اند و نقشی کمتر در بروز بو یا تولید سم در آب دارند.

۱-۷- متابولیت‌های جلبکی

متابولیت‌های ثانویه محصول مسیرهای متابولیکی غیر ضروری برای رشد جلبک‌ها هستند اما اثرات شدیدی بر کیفیت و ایمنی آب دارند. این ترکیبات شامل دو گروه اصلی می‌باشند.

الف) ترکیبات ایجادکننده طعم و بو شامل (ترکیب شناخته‌شده در این دسته) عبارتند از:

-ژئوزمین (Geosmin): الکل دوترپنی تولید شده توسط *Oscillatoria* و برخی *Actinomycetes* که موجب بوی خاک در آب می‌شود.

-متیل ایزوبورنئول (MIB): ترکیبی مشابه ژئوزمین که بوی کپک مانند در آب ایجاد می‌کند.

هر دو ترکیب غیرسمی‌اند، اما در غلظت‌های پایین در حد ng/L می‌توانند توسط انسان حس شوند و در تصفیه‌خانه‌ها به‌سختی حذف می‌شوند.

ب) سموم سیانوباکتریایی (Cyanotoxins):

سیانوباکتری‌ها مجموعه‌ای از سموم تولید می‌کنند که تحت عنوان سیانوتوکسین‌ها شناخته می‌شوند. مهم‌ترین آن‌ها شامل میکروسیستین‌ها (Microcystins)، آناتکسین (Anatoxin-a)، ساکسی توکسین (Saxitoxin) و سیلیندرو سپر موپسین (Cylindrospermopsin) می‌باشند. وجود این ترکیبات در مقادیر اندک نیز می‌تواند خطرات بالقوه‌ای برای سلامت انسان ایجاد کند [۱].

۸-۱- سیانوباکتری‌ها و سیانوتوکسین‌ها

سیانوتوکسین‌ها توسط چندین گونه از سیانو باکتری‌ها تولید می‌شوند. میکرو سیستین‌ها (MCs) پپتیدهای هفت‌تایی طبیعی هستند که توسط سوبیه‌های گونه‌های مختلف سیانوباکتری‌ها، عمدتاً در محیط‌های آب شیرین تولید می‌شوند. این سموم به طور گسترده در سراسر جهان، به ویژه در ارتباط با سوبیه‌هایی از جنس‌های رایج سیانوباکتریایی مانند میکروسیستیس (*Microcystis*)، پلنکتوتریکس (*Planktothrix*) و دولیشوسپروموم (*Dolichospermum*) یافت می‌شوند. در میان بیش از ۲۵۰ میکرو سیستین شناسایی شده تا به امروز، تنها تعداد کمی به طور مکرر و با غلظت‌های بالا وجود دارند. میکرو سیستین‌ها معمولاً درون سلولی باقی می‌مانند و مقادیر قابل توجهی از آن‌ها تنها در هنگام پارگی سلول (یعنی لیز شدن) به آب اطراف آزاد می‌شوند. یکی از رایج‌ترین میکرو سیستین‌ها و مورد مطالعه‌ترین آن‌ها، میکرو سیستین-ال آر (MC-LR) است. در منابع آب سطحی که شکوفایی سیانوباکتری‌ها حادث شده، آب آشامیدنی محتمل‌ترین مسیر مواجهه با میکرو سیستین‌ها است. فعالیت‌های تفریحی در دریاچه‌های دارای شکوفایی سیانوباکتریایی نیز می‌تواند یک مسیر مواجهه مرتبط باشد، که بالقوه منجر به غلظت‌های بالا و معمولاً متناوب می‌شود. مطالعات محدودی نشان می‌دهند که میکرو سیستین‌ها ممکن است در برخی اقلام غذایی نیز تجمع یابند [۱]. در جدول شماره یک خلاصه‌ای از سیانوباکتری‌های پلانکتونی آب شیرین تشکیل‌دهنده شکوفایی که سموم تولید می‌کنند ارائه گردیده است.

جدول ۱ - سیانوباکتری‌های پلانکتونی آب شیرین تولید کننده سموم [۱]

سیانوتوکسین‌ها	جنس فعلی (جنس قبلی) و گونه
میکروسیستین‌ها، آناتوکسین‌ها، سیلندروسپرموپسین‌ها	<i>Anabaena</i> spp.
سیلندروسپرموپسین‌ها، ساکسیتوکسین‌ها، آناتوکسین‌ها	<i>Aphanizomenon</i> spp.
سیلندروسپرموپسین‌ها	<i>Chrysothrix (Aphanizomenon) ovalisporum</i>
آناتوکسین‌ها، ساکسیتوکسین‌ها	<i>Cuspidothrix (Aphanizomenon) issatschenkoi</i>
میکروسیستین‌ها، آناتوکسین‌ها، ساکسیتوکسین‌ها	<i>Cuspidothrix (Raphidiopsis) mediterranea</i> <i>Dolichospermum (Anabaena) spp.</i>
میکروسیستین‌ها	<i>Microcystis</i> spp.
میکروسیستین‌ها	<i>Planktothrix</i> spp.
سیلندروسپرموپسین‌ها، ساکسیتوکسین‌ها	<i>Raphidiopsis</i> spp., in particular, <i>Raphidiopsis</i> (<i>Cylindrospermopsis</i>) <i>raciborskii</i>

۱-۹- دلایل شکوفایی جلبکی

سیانو باکترها به طور طبیعی در دریاچه‌ها، برکه‌ها و سایر آبهای سطحی یافت می‌شوند. همانند سایر جلبکها، در صورت فراهم شدن شرایط مساعد، سیانوباکترها به سرعت در آبهای سطحی رشد می‌کنند و شکوفایی سیانوباکتریایی ایجاد می‌شود. برخی از سیانوباکترها از جمله آنابناها به دلیل داشتن واکوئل هوایی در سطح آب یا در زیر سطح آب شناور می‌گردند و باعث ایجاد رنگ سبز یا سبز-آبی می‌شوند. برخی از سانوباکترها نظیر *Planktothrix agardhii* در رسوبات کف یافت می‌شوند و زمانیکه متابولیزه می‌شوند توسط سیلابی شدن جریان یا ایجاد اختلاط در رسوبات، در سطح آب شناور می‌شوند. اما برخی دیگر از سیانوباکترهای شکوفا شده (نظیر سیلندروسپرموپسیس) ممکن است در ستون آب پخش شوند و باعث تغییر رنگ آب شوند. فاکتورهایی که شکوفای سیانوباکترها و اثرات آنها را سرعت می‌بخشند شامل افزایش ساعت‌های آفتابی و تابش مستقیم نور خورشید، افزایش و در دسترس بودن مواد مغذی به ویژه ازت و فسفر، افزایش دمای آب، تغییرات pH، افزایش نزولات جوی، راکد بودن آب و فقدان اختلاط‌های عمودی می‌باشد. باید توجه نمود که ارتباط تنگاتنگ این فاکتورها منجر به تغییرات سالیانه در میزان سیانوباکترها می‌شود. به عنوان مثال برخی از گونه‌های مولد سم در ابتدای تابستان و برخی دیگر در اواخر تابستان یافت می‌شوند [۱، ۱۷].

۱-۱۰- اثرات بهداشتی ناشی از مواجهه با سیانوتوکسین‌ها

شکوفایی سیانوباکتریایی می‌تواند برای محیط زیست، حیوانات و سلامت انسان‌ها مضر باشد. تجزیه بلوم سیانوباکتریایی باعث مصرف اکسیژن می‌شود، شرایط هایپوکسیک ایجاد می‌کند که مرگ گیاهان و حیوانات را به دنبال دارد. در صورت بهینه بودن شرایط نور و مواد مغذی، برخی از گونه‌ها، متابولیت‌های ثانویه سمی ایجاد می‌کنند که به سیانوتوکسین‌ها معروفند. معمول‌ترین سموم سیانوباکترها و اثرات بهداشتی آنها در جدول شماره دو خلاصه شده است. شرایطی که منجر به تولید سم توسط سیانوباکترها می‌شود بخوبی شناسایی نشده‌اند. برخی از گونه‌هایی که توانایی تولید سم دارند، در همه شرایط سم تولید نمی‌کنند. این گونه‌ها اغلب از اعضای جنس‌های متداول تشکیل دهنده بلوم هستند. برخی از گونه‌ها قادرند انواع مختلفی از سیانوتوکسین‌ها را تولید نمایند. روش‌های مولکولی می‌توانند در

تشخیص حضور ژن‌های تولید کننده سم استفاده شوند. اگرچه، آنالیز کمی سیانوتوکسین‌ها برای تشخیص اینکه سیانوباکترها مولد سم هستند یا خیر مورد نیاز است. آبهای آلوده به سیانوباکترها ممکن است فاقد طعم و مزه باشد. در اغلب موارد سموم سیانوباکترها به طور طبیعی به صورت درون سلولی (در درون سیتوپلاسم) هستند. تقریباً ۹۵٪ از آناتوکسین-a و انواع میکروسیستین‌ها به صورت درون سلولی یافت می‌شوند. بطوریکه با مرگ سلول و از هم پاشی دیواره سلولی، این سموم به درون آب راه می‌یابند که به آن سموم خارج سلولی گفته می‌شود. اگرچه برخی از سموم نظیر سیلندروسپرموپسین به طور طبیعی توسط سلول زنده سیانوباکتریایی به درون آب آزاد می‌شوند. سموم خارج سلولی ممکن است به مواد آلی یا مواد رسی جذب شوند و معمولاً حذف آنها نسبت به سموم درون سلولی مشکل‌تر است [۱۷].

جدول ۲- سیانوباکترهای متداول تولید کننده سم و اثرات بهداشتی آنها [۱۷]

سیانوتوکسین (Cyanotoxin)	تعداد واریانت‌ها	اندام اصلی تحت تأثیر	اثرات سلامتی	رایج‌ترین سیانوباکتری تولید کننده سم
میکروسیستین‌ها (Microcystins)	>۱۰۰	کبد	درد شکمی، استفراغ و اسهال، التهاب و خونریزی کبد، ذات‌الریه حاد	<i>Microcystis</i> , <i>Dolichospermum</i> (previously <i>Anabaena</i>), <i>Nodularia</i> , <i>Planktothrix</i> , <i>Fischerella</i> , <i>Nostoc</i> , <i>Oscillatoria</i> , and <i>Gloeotrichia</i>
سیلندر و اسپرموپسین (Cylindrospermopsin)	۳	کبد	درماتیت حاد، آسیب کلیوی، ترویج بالقوه رشد تومور	<i>Raphisiopsis</i> (previously <i>Cylindrospermopsis</i>) <i>raciborskii</i> , <i>Aphanizomenon flos-</i> <i>aquae</i> , <i>Aphanizomenon</i> <i>gracile</i> , <i>Aphanizomenon</i> <i>ovalisporum</i> , <i>Umezakia</i> <i>natans</i> , <i>Dolichospermum</i> <i>bergii</i> , <i>Dolichospermum</i> <i>lapponica</i> , <i>Dolichospermum</i> <i>planctonica</i> , <i>Lyngbya</i> <i>wollei</i> , <i>Raphidiopsis</i> <i>curvata</i> , and <i>Raphidiopsis</i> <i>mediterranea</i>
گروه آناتوکسین-a (Anatoxin-a group)	۲-۶	سیستم عصبی	گزگز، سوزش، بی‌حسی، خواب‌آلودگی، اختلال در تکلم، سالیواسیون (ترشح بزاق)، فلج تنفسی منجر به مرگ (علائم مشاهده شده در حیوانات)	<i>Chrysosporum</i> (<i>Aphanizomenon</i>) <i>ovalisporum</i> , <i>Cuspidothrix</i> , <i>Raphisiopsis</i> , <i>Cylindrospermum</i> , <i>Dolichospermum</i> , <i>Microcystis</i> , <i>Oscillatoria</i> , <i>Planktothrix</i> , <i>Phormidium</i> , <i>Dolichospermum flos-</i> <i>aquae</i> , <i>A. lemmermannii</i> <i>Raphidiopsis mediterranea</i>

				(strain of <i>Raphisiopsis raciborskii</i>), <i>Tychonema</i> and <i>Woronichinia</i>
ساکسیتوکسین (<i>Saxitoxin</i>)	>۵۰	سیستم عصبی	گزگز، بی‌حسی، سردرد، سرگیجه، حالت تهوع، استفراغ و اسهال، کوری موقت، فلج و مرگ	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> , <i>Dolichospermum circinalis</i> , <i>Lyngbya wollei</i> , <i>Planktothrix</i> spp. and a Brazilian isolate of <i>Raphisiopsis raciborskii</i> .

هر گروه از سیانوتوکسین‌ها دارای ویژگی‌های خاص خود هستند و نگرانی‌های متفاوتی را ایجاد می‌کنند، از جمله آسیب به کبد و کلیه، سمیت عصبی، و تحریک رشد تومور. نگرانی اصلی مربوط به تماس مکرر یا مواجهه مزمن با دو گروه از سیانوتوکسین‌هاست که شامل میکروسیستین‌ها (MCs) و سیلندروسپرموپسین‌ها (CYNs) می‌باشند. برای سایر گروه‌ها، نگرانی عمدتاً به سمیت حاد مربوط می‌شود، به ویژه در مورد ساکسیتوکسین‌ها (STXs) و احتمالاً آناتوکسین‌ها (ATXs) [۱].

مواجهه با سیانوباکتريها و سموم آنها می‌تواند از طریق نوشیدن آب آشامیدنی آلوده به سیانوتوکسین‌ها و نیز از طریق تماس مستقیم، و تنفس در هنگام فعالیت‌های تفریحی اتفاق بیفتد. مواجهه طولانی مدت با سیانوباکتريها و سموم آنها در هنگام فعالیت‌های تفریحی در آب‌های آلوده منجر به علائمی همچون تب، سردرد، درد مفاصل و عضلات، تاول، تهوع، اسهال، زخم‌های دهانی و ایجاد آلرژی می‌گردد. این علائم ممکن است پس از چند دقیقه تا چند روز بعد از مواجهه با آب آلوده بروز نمایند. در موارد حاد، تشنج، از کار افتادگی کبد، توقف تنفس و ندرتاً مرگ رخ می‌دهد. اگرچه مطالعات جدیدی در مورد تاثیر بر روی سایر سیستم‌ها از جمله قلب، کلیه، تولید مثل، خون و معده و روده نیز انجام شده است. شواهدی دال بر ایجاد تومور در اثر تماس طولانی مدت با مقادیر کم میکروسیستین‌ها و سیلندروسپرموپسین وجود دارد اگرچه، اطلاعات بیشتری برای تعیین سرطان‌زایی این دو نوع سم نیاز است. گزارش‌های مستند متعددی در مورد مرگ سگ‌ها، پرندگان و چهارپایان در اثر مصرف آب‌های سطحی دارای بلوم سیانوباکتریایی وجود دارد [۱، ۲، ۱۷].

۱-۱۱-سم‌شناسی سیانوتوکسین‌ها

اثرات مواجهه با سیانوتوکسین‌ها در انسان عمدتاً به مطالعات اپیدمیولوژیکی برمی‌گردند که در چند اپیدمی در طول قرن گذشته اتفاق افتاده‌اند. علائم از گاستروانتریت، درد شکمی، علائم شبه آنفلوآنزا، تحریک و قرمزی گوش و چشم تا آسیب به کبد و کلیه وجود داشته است. به طور کلی اثرات این سیانوتوکسین‌ها را می‌توان به اثر بروی کبد (هپاتوتوکسین‌ها)، اثر بروی سیستم عصبی (نوروتوکسین‌ها) و اثر بر روی پوست (درماتوتوکسین‌ها) دسته بندی نمود. اگر چه اثر این سموم بر روی سیستم خونی، قلبی-عروقی، گوارشی، تولید مثلی و کلیوی در گزارشات متعدد گزارش گردیده است [۱۸]. اثرات بهداشتی مواجهه با میکروسیستین‌ها در اثر مصرف آبهای حاوی سیانوباکتری تولیدکننده میکروسیستین‌ها در گزارشات متعددی بررسی شده است. دامنه این اثرات از افزایش میزان آنزیمهای کبدی موجود در

پلاسما تا گاستروانتریت و حتی مرگ می‌باشد [۱، ۲، ۱۶]. اگرچه کبد ارگان هدف اصلی در مواجهه حاد با سم میکروسیستین است، اما علایم نورولوژیک در مواجهه انسانی در کشور برزیل مشاهده شد. جدی‌ترین مواجهه انسانی با سم میکروسیستین در کشور برزیل رخ داده است. در سال ۲۰۰۲ از ۱۰۶ بیمار برزیلی که تحت مداوا با دستگاه‌های همودیالیز قرار گرفتند، ۵۶ نفر از آنها به دلیل تماس با آب حاوی میکروسیستین فوت شدند [۱۹]. همچنین در اپیزود دیگری در سال ۱۹۹۶ در منطقه Caruaru کشور برزیل مواجهه ۱۲۶ بیمار دیالیزی با سم میکروسیستین صورت گرفت که ۶۰ نفر از آنها در نهایت در نتیجه نارسایی کبد مردند (۶ نفر پس از دو هفته، ۳۰ نفر پس از ۶ هفته، ۴۴ نفر پس از ده هفته و ۵۵ نفر پس از ۲۷ هفته مواجهه). غلظت میکروسیستین باندنشده (به صورت آزاد در آب) $19.5 \mu\text{g/L}$ در آب و میانگین غلظت میکروسیستین 223 ng/g در کبد افراد مرده (اتوپسی) گزارش گردید [۲۰]. مواردی از مسمومیت‌های انسانی در مواجهه کوتاه مدت/حاد با سم میکروسیستین در نتیجه تصفیه ناکافی ذخایر آب آشامیدنی و حتی در نتیجه‌ی شنا در آب‌های حاوی میکروسیستین در کشورهای متعدد دنیا رخ داده است [۱۸].

۱-۱۲- سرطانزایی سیانوتوکسین‌ها

آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC) با مرور مطالعات اپیدمیولوژیک، افزایش سرطانهای کبد و روده بزرگ را در افرادی که در مناطق با آب‌های سطحی دارای گونه‌های میکروسیستیس (و سموم دیگر جلبکی) نسبت به افراد مناطق دارای آب‌های سطحی سالم گزارش نموده است. از نظر اثرات سرطانزایی، آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان میکروسیستین-LR را به عنوان یک ماده گروه 2B (احتمالاً سرطانزا) طبقه‌بندی نموده است. با این وجود، گزارش یکی از محققین برجسته مطالعات سیانوتوکسین ایجاد تومورهای پوست در حیوانات آزمایشگاهی را تایید می‌کند و در مورد افزایش ریسک ابتلا به تومورهای انسانی از طریق آب آشامیدنی هشدار می‌دهد. همچنین، افزایش غلظت میکروسیستین‌ها در نمونه‌های آب آشامیدنی نواحی از کشور چین که از نواحی اندمیک سرطان کبد است هشدار در مورد سرطانزایی این سموم را جدی تر می‌کنند [۱، ۲، ۱۷].

۱-۱۳- پایداری سیانوتوکسین‌ها

میکروسیستین‌ها شدیداً پایدار و مقاوم به تجزیه شیمیایی هستند و به همین دلیل این سموم با جوشاندن آب از بین نمی‌روند، اگرچه برخی مطالعات تجزیه این سموم در نور آفتاب را نشان داده‌اند. همانند میکروسیستین‌ها، سیلندروسپرموپسین و آناتوکسین-a نیز به جوشاندن و فرارگیری در شرایط تاریکی به شدت پایدار هستند اما فوتولیز آنها در مدت ۳ روز تا دو هفته در شرایط نور آفتاب امکان‌پذیر است [۲، ۱۷].

۱-۱۴- روش‌های آنالیز

سازمان حفاظت محیط زیست امریکا (EPA) روش ۵۴۴ را برای آب آشامیدنی توسعه داده است. این روش پیشنهادی روش کروماتوگرافی مایع/اسپکترومتري جرمی است (LC/MS/MS) است که برای آنالیز میکروسیستین‌ها و نودولارین (درون سلولی و بیرون سلولی مرکب) استفاده می‌شود. روش ۵۴۵ روش LC-ESI/MS/MS است که برای تعیین سیلندروسپرموپسین و آناتوکسین-a استفاده می‌شود. روش ۵۴۶ روش ADDA-ELISA می‌باشد. در جدول شماره ۳ روش‌های موجود برای اندازه‌گیری سیانوتوکسین‌ها در آب‌های شیرین گردیده است.

کیت‌های تست الایزا که بصورت تجاری در دسترس است که به دلیل تجهیزات کم هزینه و استفاده آسان یکی از روش‌های متداول آنالیز سیانوتوکسین‌ها می‌باشند. این یک روش نیمه-کمی می‌باشد که بیشتر برای تعیین حضور یا عدم حضور سیانوتوکسین‌ها استفاده می‌شود. اگر با این تست حضور سیانوتوکسین‌ها تایید گردد، پیشنهاد شده که روش‌های کمی با استفاده از تست الایزای کمی یا یکی دیگر از روش‌های آنالیز اشاره شده در جدول ۳ بصورت مکرر استفاده شود. کیت‌های الایزای دقیقتر نیز وجود دارد که برای آنالیز میکروسیستین‌ها و نودولارین (ADDA-ELISA)، ساکسی توکسین، آناتوکسین-a و سیلندروسپرموپسین استفاده می‌شوند. اگرچه این روش‌ها نتایج را به سرعت مشخص می‌نمایند، اما از این جهت که انتخابی نیستند و مقدار سموم مختلف را بصورت تفکیک شده مشخص نمی‌کنند، دارای محدودیت هستند. روش‌های مبتنی بر کروماتوگرافی مایع ترکیب شده با اسپکترومتر جرمی (LC/MS) قادرند به طور دقیق و کمی، سیانوتوکسین‌هایی که برای آنها استاندارد وجود دارد، استفاده شوند [۱، ۱۷].

جدول ۳- روش‌های آنالیز سیانوتوکسین‌ها در آب‌های شیرین [۱۷]

Methods	Anatoxins	Cylindrospermopsin	Microcystins	Saxitoxin
Biological Assays				
Mouse	Yes	Yes	Yes	
Protein Phosphatase Inhibition Assays (PPIA)	No	No	Yes	
Neurochemical	Yes	No	No	
Enzyme-Linked Immunosorbent Assays (ELISA)	Yes	Yes	Yes	Yes
Chromatographic Methods				
<i>Gas Chromatography</i>				
Gas Chromatography with Flame Ionization Detection (GC/FID)	Yes	No	No	No
Gas Chromatography with Mass Spectrometry (GC/MS)	Yes	No	No	No
<i>Liquid Chromatography</i>				
Liquid Chromatography / Ultraviolet - Visible Detection (LC/UV or LC/PDA)	Yes	Yes	Yes	Yes
Liquid Chromatography/ Fluorescence (LC/FL)	Yes	No	No	Yes
<i>Liquid Chromatography Combined with Mass Spectrometry</i>				
Liquid Chromatography Ion Trap Mass Spectrometry (LC/IT MS)	Yes	Yes	Yes	Yes
Liquid Chromatography Time-of- Flight Mass Spectrometry (LC/TOF MS)	Yes	Yes	Yes	Yes
Liquid Chromatography Single Quadrupole Mass Spectrometry (LC/MS)	Yes	Yes	Yes	Yes
Liquid Chromatography Triple Quadrupole Mass Spectrometry (LC/MS/MS)	Yes	Yes	Yes	Yes

۱-۱۵- استانداردها و دستورالعملهای ملی و جهانی مرتبط

در حال حاضر هیچگونه مقادیر رهنمود ایالتی برای سیانوباکترها یا سموم ناشی از آنها در آبهای آشامیدنی یا آبهایی که برای مصارف تفریحی استفاده می شوند، در ایالت متحده وجود ندارد. سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا در سال ۲۰۱۵ هشدارهای بهداشتی آب آشامیدنی را برای میکروسیستین و سیلندروسپرموپسین به چاپ رساند. این سازمان مقادیر هشدار سلامتی $0.3 \mu\text{g/L}$ برای میکروسیستین ها و $0.7 \mu\text{g/L}$ را برای سیلندروسپرموپسین در آب آشامیدنی برای کودکان پیش دبستانی و جوانتر (کمتر از ۶ سال) را پیشنهاد نمود. برای کودکان با سن بیشتر از ۶ سال و بزرگسالان، مقادیر پیشنهادی تا حد $1.6 \mu\text{g/L}$ برای میکروسیستین ها و $3 \mu\text{g/L}$ برای سیلندروسپرموپسین می باشد. از آنجاییکه در مقایسه با بزرگسالان، بچه ها مقدار آب بیشتری نسبت به وزن بدنشان مصرف می نمایند، بیشتر مستعد دریافت این سموم هستند [۲۱].

سازمان بهداشت جهانی حد ۱ میکروگرم بر لیتر را برای مجموع میکرو سیستین ها اغلب به عنوان آنالوگ های اصلی مانند (LR, RR, YR) به عنوان یک سطح ایمن و راهنمای موقت برای مصرف طولانی مدت در نظر گرفته است [۱]. کشورهایمانند برزیل، نیوزلند، ژاپن و اسپانیا اخیراً این راهنمای موقت سازمان جهانی بهداشت برای میکروسیستین LR در آب آشامیدنی را به صورت رسمی پذیرفته اند. کشور آفریقای جنوبی محدوده صفر تا 0.8 میکرو گرم بر لیتر برای میکروسیستین ها در آب را استفاده می کند که پایین تر از مقدار پیشنهادی WHO است در مقابل کشورهایمانند استرالیا و کلمادا دستورالعمل هایی را تدوین کرده اند که محدوده بالاتر از WHO را در بر می گیرند [۱۶]. بهمنچنین حداکثر مقدار مجاز سم میکرو سیستین به عنوان شاخص سموم جلبکی در منابع آب شرب برابر استاندارد ۱۰۵۳ کشور، برابر یک میکروگرم بر لیتر تعیین گردیده است. میکرو سیستین ها معمولاً به صورت مخلوط وجود دارند. مقادیر راهنما بر اساس MC-LR می باشد که یکی از سمی ترین و رایج ترین میکرو سیستین ها است [۲۲].

۱-۱۶- تصفیه سیانوکسین ها و مدیریت شکوفایی سیانوباکتریایی

احتمال شکل گیری شکوفایی سیانوباکترها (bloom) با درک ویژگی های اکوسیستم آبی قابل ارزیابی است. از جمله پایش غلظت مواد مغذی، عمق توده آبی، زمان ملند آب، الگوهای اختلاط و لایه بندی حرارتی. در مواردی که شرایط، احتمال شکوفایی را بالا می برد، پایش بصری منبع آب (از جمله بررسی میکروسکوپی برای شناسایی جنس های تولیدکننده میکروسیستین) ضروری است، زیرا افزایش زیست توده سیانوباکتریایی می تواند سریع رخ دهد. افزایش غلظت شاخص های زیست توده یا میکروسیستین ها باید منجر به اقدام مدیریتی فوری شود تا از مواجهه با غلظت های بالای سم پیشگیری گردد. مسیر اصلی مواجهه انسان با سیانوتوکسین ها، مصرف آب آشامیدنی آلوده است؛ از این رو حذف مؤثر آنها در فرایندهای تصفیه آب امری حیاتی است. فرایندهای انعقاد - لخته سازی و ته نشینی در تصفیه خانه های آب آشامیدنی اغلب به دلیل ویژگی های فیزیکوشیمیایی خاص سیانوباکتری ها مانند شناوری، آب دوستی سطح، و دافعه الکترواستاتیکی با ناکارآمدی مواجه اند. افزایش میزان ماده منعقدکننده نیز کارایی حذف را به طور چشمگیری بهبود نمی دهد. این ناکارآمدی موجب گرفتگی فیلترها، نقض هیدرولیکی در سیستم فیلتراسیون سریع، و عبور سلول ها از سدهای فیلتراسیون می شود. تراکم هایی به کوچکی 700 سلول در هر میلی لیتر قادر به انسداد کامل فیلترها بوده و حجم آب مصرفی در عملیات شست و شوی معکوس گاه برابر با کل مصرف آب یک جامعه است.

کلر زنی پس از فیلتراسیون نیز با تجزیه سلول ها و آزادسازی سموم درون سلولی کیفیت آب را کاهش داده و چالش های جدیدی برای شبکه های توزیع ایجاد می کند. حتی تجزیه فیتوپلانکتون های غیر سمی می تواند به رهاسازی ترکیبات درون سلولی منجر شود که باعث بو، رنگ و طعم نامطلوب آب می شود. روش پیش اکسیداسیون یکی از راهکارهای پر کاربرد برای بهبود حذف سیانوباکتری ها در فرایندهای انعقاد و ته نشینی است. با این حال، در برخی موارد موجب لیز سلولی و آزادسازی سموم می شود. روش مطلوب باید سیانوباکتری ها را بدون تخریب سلول حذف کند و در عین حال ترکیبات درون سلولی را مدیریت نماید. کاربرد ریز صافی ها (میکرو استرینرها) و پیش اکسیداسیون ملایم و دز مناسب راهکاری امید بخش به شمار می رود؛ زیرا با حفظ یکپارچگی سلول، کارایی انعقاد را افزایش داده و خطر آزادسازی سموم را کاهش می دهد. با وجود پژوهش های فراوان درباره پیش اکسیداسیون، مطالعاتی که به طور خاص بر پیش اکسیداسیون ملایم تمرکز دارند بسیار محدودند. برای ارتقای کارایی حذف سیانوباکتری ها از آب آشامیدنی، ضروری است ابتدا چالش ها و پیامدهای ناشی از شکوفایی های جلبکی مضر در تصفیه خانه های متعارف به درستی درک شود [۱، ۱۷، ۲۳].

روش های حذف سیانوتوکسین ها با یکدیگر متفاوت است. به این معنی که ممکن است یک گزینه برای حذف سیانوتوکسین خاص، برای سیانوتوکسین دیگر قابل استفاده نباشد. استراتژی های موثر مدیریتی به درک صحیح در مورد الگوهای رشد و نوع گونه های غالب سیانوباکترها، ویژگی های سیانوتوکسین ها (درون سلولی یا برون سلولی) و نوع فرایندهای تصفیه بستگی دارد. به عنوان مثال، اکسیداسیون میکروسیستین به کلر زنی، pH و دمای آب بستگی دارد. کاربرد تصفیه نادرست می تواند به سلول ها آسیب برساند و بجای اینکه سیانوتوکسین ها حذف شوند، منجر به آزاد سازی آنها در آب می شود. برای اجتناب از رهاسازی سیانوتوکسین ها در آب، بهره برداران تصفیه آب آشامیدنی می توانند استراتژی های مختلفی را بکار ببرند. به عنوان مثال در صورت دسترسی به منبع جایگزین باید از منبع آب سالمتر استفاده نمایند. روش دیگر تنظیم عمق آبیگری از طریق برج آبیگری است که مانع آبیگری از نواحی آلوده گردد. پیش اکسیداسیون به دلیل تجزیه نمودن سلول ها و در نتیجه رهائش سموم در آب با نگرانی همراه است. بنابراین استفاده از سولفات مس و ازن در محل آبیگری پیشنهاد نمی شود. کلر زنی نیز علاوه بر تجزیه سلول ها منجر به تشکیل محصولات جانبی می شود. بنابراین در صورتیکه اکسیداسیون در فاز پیش تصفیه ضروری باشد، بررسی دقیق کیفیت آب ورودی اهمیت دارد، زیرا پیش اکسیداسیون موثر به عواملی همچون نوع گونه های جلبکی، نوع اکسید کننده و دوز اکسید کننده بستگی دارد [۱۷، ۲۳]. جدول شماره ۴ تاثیر روش های مختلف تصفیه آب را در حذف سیانوتوکسین های درون سلولی و برون سلولی را به طور خلاصه ارائه می نماید.

۱-۱۶-۱- حذف سیانوتوکسین درون سلولی

فرایندهای متداول تصفیه آب آشامیدنی (انعقاد، لخته سازی، ته نشینی و فیلتراسیون) برای حذف سیانوتوکسین های درون سلولی (سلول های سیانوباکتریایی) موثر هستند. انعقاد، لخته سازی و شناور سازی با هوای محلول (DAF) نسبت به ته نشینی موثرتر هستند. میکرو فیلتراسیون و اولترافیلتراسیون تاثیر بسیار بالایی در میزان حذف دارند. در زمان بلوم سیانوباکتریایی ممکن است لازم باشد که بهره برداران تواتر شستشوی معکوس صافیها را بیشتر نمایند تا از این طریق از تجزیه سول ها و آزاد سازی سموم جلوگیری نمایند [۱۷].

۱-۱۶-۲- حذف فیزیکی سیانوتوکسین های برون سلولی

تکنیک های معمول حذف سموم برون سلولی عبارتند از جذب توسط کربن فعال، فیلتراسیون غشایی و غیرفعالسازی شیمیایی (استفاده از گندزداها و اکسید کننده ها). کربن فعال پودری و گرانولی از کارایی خوبی برای جذب میکروسیستین ها و سیلندروسپرموپسین برخوردارند، اگرچه گونه های میکروسیستین با کارایی های مختلف بر روی کربن فعال جذب می شوند. کارایی حذف به عوامل مختلفی از جمله غلظت سم، کیفیت آب ورودی (غلظت NOM)، دوز PAC و نوع کربن فعال بستگی دارد. آزمایش جار برای تعیین کارایی توسط کربن فعال پیشنهاد می شود. نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس نیز کارایی دارند. اگرچه، آزمایشات خاص محلی لازم است زیرا میزان کارایی حذف به توزیع اندازه منافذ غشاء و کیفیت آب بستگی دارد [۱۷].

۱-۱۶-۳- اکسیداسیون سیانوتوکسین های برون سلولی

اشعه فرابنفش در دوز معمولی که در تصفیه خانه ها استفاده می شود کارایی چندانی در حذف سموم میکروسیستین، آناتوکسین a- و سیلندروسپرموپسین ندارد و دوزهای بالاتر لازم است. به عنوان مثال دوز UV مورد نیاز برای غیر فعالسازی کریپتوسپوریديوم پارووم 40 mJ/cm^2 است، در حالیکه این دوز برای میکروسیستین، سیلندروسپرموپسین و آناتوکسین a- در حدود $1530-20000 \text{ mJ/cm}^2$ است. استفاده از روش های AOPs نیز به شدت تحت تاثیر مقدار مواد آلی موجود در آب است. اکسید کننده هایی نظیر کلر، ازن و پرمنگنات برای غیرفعالسازی میکروسیستین ها قابل استفاده هستند اما تاثیر کلر آزاد به میزان pH وابسته است. آناتوکسین a- به کلر آزاد مقاوم است. ازن کارایی خوبی دارد اما کارایی آن تحت تاثیر حضور مواد آلی آب است. ازن برای آناتوکسین a- نیز قابل استفاده است اما استفاده از ازن وابسته به pH است. ازن برای غیر فعالسازی ساکسی توکسین کارایی ندارد. پرمنگنات برای اکسیداسیون میکروسیستین و آناتوکسین a- موثر است اما برای سیلندروسپرموپسین موثر نمی باشد. کلرآمین ها و دی اکسید کلر برای تصفیه میکروسیستین، آناتوکسین a- یا سیلندروسپرموپسین موثر نمی باشند [۱۷].

جدول ۴- فرآیندهای تصفیه سیانوتوکسین ها و کارایی آنها [۱۷]

اثر نسبی	فرایند تصفیه
حذف سیانوتوکسین های درون سلولی (سلول های دست نخورده)	
اکسیداسیون اغلب باعث استرس یا لیز شدن سلول های سیانوباکتری می شود و سیانوتوکسین را به بدنه آب آزاد می کند. اگر اکسیداسیون برای برآورده کردن اهداف تصفیه لازم است، استفاده از دوزهای پایین تر اکسیدکننده که کمتر احتمال لیز سلول دارند، توصیه می شود. اگر اکسیداسیون با دوز بالاتر ضروری است، باید دوز به اندازه ای کافی باشد که نه تنها سلول ها را منهدم کند، بلکه تمام سموم کلی موجود را نیز از بین ببرد.	اکسیداسیون پیش تصفیه
برای حذف سموم درون سلولی (سلول های سیانوباکتریایی) مؤثر است. اطمینان حاصل شود که سلول های به دام افتاده در لجن به طور منظم حذف شوند تا از آزاد شدن سموم جلوگیری شود. اطمینان حاصل شود که مایع رویی لجن (سوپرناتانت) پس از جداسازی لجن به منبع آب بازگردانده نشود.	انعقاد / ته نشینی / فیلتراسیون
برای حذف سیانوتوکسین های درون سلولی (سلول های سیانوباکتریایی) مؤثر است. میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون زمانی مؤثر هستند که سلول ها اجازه انباشت بر روی غشا را برای مدت طولانی نداشته باشند. در طول شکوفایی جلبکی، ممکن است نیاز به تمیز کردن مکرر وجود داشته باشد.	غشاها

شناورسازی	فرایندهای شناورسازی، مانند شناورسازی با هوای محلول (DAF)، برای حذف سیانوتوکسین‌های درون‌سلولی مؤثر هستند، زیرا بسیاری از سلول‌های تولیدکننده سم سبک‌تر از آب بوده و شناور می‌شوند.
حذف سیانوتوکسین‌های خارج‌سلولی (محلول)	
غشاها	اثربخشی بستگی به نوع سیانوتوکسین، جنس غشا، اندازه منافذ غشا و کیفیت آب خام دارد. نانوفیلتراسیون معمولاً در حذف میکروسیستین‌های خارج‌سلولی مؤثر است. اسمز معکوس بیشتر برای حذف میکروسیستین و سیلیندروسپرمپسین کاربرد دارد. احتمال بروز لیز سلولی زیاد است. مطالعه بیشتر برای ارزیابی عملکرد ضروری است.
پرمگنات پتاسیم	در اکسیداسیون میکروسیستین‌ها و آاناتوکسین‌ها مؤثر است. تحقیق بیشتر برای سیلیندروسپرمپسین لازم است. در اکسیداسیون ساکسیتوکسین مؤثر نیست.
ازن	در اکسیداسیون میکروسیستین‌ها، آاناتوکسین a- و سیلیندروسپرمپسین بسیار مؤثر است. در اکسیداسیون ساکسیتوکسین مؤثر نیست.
کلر آمین‌ها	مؤثر نیستند
دی اکسید کلر	در دوزهایی که معمولاً برای تصفیه آب آشامیدنی استفاده می‌شود مؤثر نیست.
کلر آزاد	در اکسیداسیون میکروسیستین‌ها مؤثر است، به شرطی که pH پایین‌تر از ۸ باشد. در اکسیداسیون سیلیندروسپرمپسین و ساکسیتوکسین نیز مؤثر است. در اکسیداسیون آاناتوکسین a- مؤثر نیست.
پرتو فرابنفش (UV)	پرتو UV به‌تنهایی در اکسیداسیون میکروسیستین‌ها و سیلیندروسپرمپسین مؤثر نیست، در دوزهایی که معمولاً برای تصفیه آب آشامیدنی استفاده می‌شود. وقتی تابش UV با ازن یا پراکسید هیدروژن (فرایند «اکسیداسیون پیشرفته») ترکیب شود، در اکسیداسیون آاناتوکسین a-، سیلیندروسپرمپسین و میکروسیستین‌ها در دوزهای بالای UV مؤثر است.
جذب بر روی کربن فعال (Activated Carbon Adsorption)	کربن فعال پودری (PAC): کارایی جذب PAC به نوع کربن، اندازه حفره، نوع سیانوتوکسین و سایر پارامترهای کیفیت آب مانند غلظت مواد آلی طبیعی (NOM) بستگی دارد. کربن‌های فعال چوبی معمولاً در جذب میکروسیستین‌ها مؤثرترند. تحقیقات بیشتری برای ارزیابی کارایی PAC در جذب سیلیندروسپرمپسین، آاناتوکسین a- و ساکسیتوکسین لازم است، هرچند تحقیقات محدود نتایج امیدوارکننده‌ای نشان داده‌اند. غلظت‌های بالاتر از ۲۰ میلی‌گرم در لیتر ممکن است برای حذف کامل سموم مورد نیاز باشند، به‌ویژه زمانی که غلظت NOM بالا باشد. کربن فعال گرانولی (GAC): کارایی جذب GAC نیز به نوع کربن، اندازه حفره، نوع سیانوتوکسین و پارامترهای کیفیت آب مانند غلظت NOM بستگی دارد. GAC در حذف میکروسیستین‌ها مؤثر است و احتمالاً در حذف سیلیندروسپرمپسین، آاناتوکسین a- و ساکسیتوکسین نیز مؤثر است. وضعیت فیزیکی کربن عامل کلیدی در تعیین کارایی GAC برای حذف سیانوتوکسین‌ها است. ممکن است لازم باشد GAC در طول فصل شکوفایی جلبکی (HAB) بیشتر احیا شود تا ظرفیت جذب کافی حفظ گردد.

۱-۱۷-ارزیابی ریسک بهداشتی

ارزیابی ریسک بهداشتی فرآیندی نظام‌مند برای تعیین احتمال بروز اثرات نامطلوب بر سلامت انسان در اثر مواجهه با مواد شیمیایی یا آلاینده‌هاست. این روش توسط سازمان‌های بین‌المللی از جمله WHO و USEPA برای مدیریت کیفیت آب آشامیدنی و مواد خطرناک زیست‌محیطی توسعه یافته است. به منظور ارزیابی خطر سلامت انسان، مواد شیمیایی معمولاً به‌طور متمایز به گروه‌های سرطان‌زا و غیر سرطان‌زا تقسیم می‌شوند [۲۴]. ارزیابی خطر یک چارچوب مفهومی است که مکانیسمی را برای بررسی اطلاعات مرتبط با تخمین پیامدهای بهداشتی و زیست‌محیطی فراهم می‌نماید. ارزیابی خطر را می‌توان به عنوانی فرآیندی در جهت برآورد احتمالات ایجاد اثرات مضر سلامتی به واسطه مواجهه با آلاینده شیمیایی محیطی در زمان‌های مختلف تعریف نمود. فرآیند ارزیابی خطر سلامت از چهار مرحله تشکیل شده که شامل شناسایی خطر، ارزیابی رابطه دوز پاسخ، ارزیابی مواجهه و توصیف خطر می‌باشد [۱۴].

در مرحله شناسایی خطر، ماهیت ماده سمی و اثرات شناخته شده آن بر سلامت انسان مورد بررسی قرار میگیرد. به عنوان نمونه برای میکروسیستین-LR همانطور که در مباحث قبلی مطرح شد، شناسایی شامل منشأ (سیانوباکتری‌ها در شکوفایی جلبکی منابع آب سطحی)، مسیر ورود به بدن (عمدتاً از طریق مصرف آب شرب، گاهی از طریق رژیم غذایی یا تماس پوستی هنگام شنا)، اثرات تندرستی (سمیت کبدی، اختلال عملکرد سلول‌های کبد و سرطان‌زایی) و طبقه‌بندی (طبق IARC در گروه B₂، یعنی احتمالاً سرطان‌زا برای انسان) می باشد [۱]. در مرحله ارزیابی رابطه دز-پاسخ، ارتباط بین میزان جذب سم و شدت اثر آن تعیین میگردد. در واقع این مرحله جهت کمی‌سازی شدت اثرات آلاینده در برابر میزان تماس است و هدف آن یافتن مقادیر دز مرجع مزمین یا RfD (Reference Dose) و فاکتور شیب یا Slope Factor (SF) می باشد. دز مرجع شامل دوزی است که بر اساس مطالعات طولانی‌مدت بدون اثرات سوء در انسان تعیین شده و برای هر ماده ممکن است متفاوت باشد. فاکتور شیب پارامتری است که برای مواد سرطان‌زا به کار می‌رود و نشان می‌دهد خطر سرطان به ازای هر واحد افزایش دز تا چه اندازه زیاد می‌شود. در مرحله ارزیابی مواجهه بررسی می‌شود انسان چقدر و چگونه در معرض آلاینده قرار گرفته و در واقع این مرحله دوز واقعی جذب‌شده روزانه یا CDI (Chronic Daily Intake) تعیین می‌گردد. و در نهایت در مرحله توصیف خطر، تمام داده‌ها ترکیب و مقدار واقعی خطر سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی برای انسان محاسبه و تفسیر می‌گردد [۲۵].

۱-۱۷-۱- ارزیابی خطر غیر سرطان‌زایی

خطرات غیر سرطان‌زایی معمولاً توسط شاخص خطر Hazard Quotient (HQ) توصیف می‌شود. شاخص خطر یک ماده شیمیایی با رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$HQ = \frac{CDI}{RFD}$$

که در آن RFD دوز مرجع مزمین و CDI جذب روزانه مزمین برای ماده شیمیایی موردنظر است. همچنین مقدار CDI مورد استفاده در این معادله از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۵].

$$CDI = \frac{C_i \cdot IR \cdot ED \cdot EF}{BW \cdot AT}$$

جهت ارزیابی پتانسیل کلی مربوط به اثرات غیر سرطان‌زایی ناشی از چندین ماده شیمیایی، یک شاخص خطر (HQ) اعمال شده است. برای ترکیبی از آلودگی‌ها، شاخص خطر چندگانه از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$THQ = \sum HQ = \sum \frac{CDI}{RFD}$$

جهت تفسیر اگر $HQ < 1$ باشد نشان می‌دهد که دوز روزانه مقدار سمی (CDI) کمتر از مقدار مرجع آن (RfD) است، بنابراین خطر بالقوه برای سلامت در سطح قابل قبولی در نظر گرفته می‌شود. اگر $HQ = 1$ باشد نشان‌دهنده این است

که دوز روزانه برابر با مقدار مرجع است، بنابراین احتمال بروز عوارض بهداشتی ممکن است افزایش یابد و نیاز به بررسی‌های بیشتر وجود دارد و در نهایت اگر $HQ > 1$ باشد نشان می‌دهد که دوز روزانه بیشتر از مقدار مرجع است و احتمال بروز عوارض بهداشتی قابل توجه است و این نیازمند اتخاذ اقدامات کنترلی می‌باشد [۲۵].

۱-۱۷-۲- ارزیابی خطر سرطان‌زایی

خطر سرطان‌زایی از طریق محاسبه احتمال افزایش سرطان رو به رشد فردی در طول زندگی یا Excess ELCR (Lifetime Cancer Risk) به‌عنوان نتیجه مواجهه با سرطان‌زاهای بالقوه تخمین زده می‌شود. فاکتور شیب (SF) مصرف روزانه احتمالی ($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{d}$) از یک سم را به طور متوسط در طول زندگی از مواجهه مستقیم به خطر افزایشی از یک سرطان روبه رشد فردی تبدیل می‌کند [۲۶].

$$ELCR = CDI \times SF$$

که در آن ELCR احتمال نامحدود ابتلا به یک سرطان روبه رشد فردی در طول زندگی و SF فاکتور شیب سرطان‌زایی است. خطرات به‌دست‌آمده بیشتر از 1×10^{-4} غیرقابل‌پذیرش تلقی می‌شود. خطرات کمتر از 1×10^{-6} فاقد اثرات قابل توجه برای سلامتی می‌باشد و خطرات بین این دو مقدار بسته به شرایط و موقعیت مواجهه به‌طور کلی در محدوده قابل قبول محسوب می‌شود [۲۷].

۱-۱۸- سابقه طرح و بررسی متون

در ایران مطالعات محدودی در زمینه‌ی متابولیت‌های جلبکی آب شرب گزارش گردیده است و مطالعاتی که در این زمینه وجود دارند کمتر به جنبه‌ی بهداشتی این متابولیت‌ها پرداخته‌اند. برای مثال شمس‌الهی و همکاران [۲۸]. در مطالعه‌ی خود فقط بر روی روش تعیین غلظت متابولیت‌ها تمرکز نموده و نشان دادند که روش محلول استونیتریل (Acetonitrile) روش مناسبی جهت تعیین متابولیت‌های جلبکی هستند، اما در این مطالعه به تعیین غلظت متابولیت‌ها در آب و خصوصاً در آب شرب پرداخته نشد.

در مطالعات خارجی موضوع فوق پیش‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال الیویرا (Oliveira) و همکاران [۲۹] مطالعه‌ای با هدف تعیین MC-LR در رودخانه آمازون که آب تصفیه شده‌ی آن مورد مصرف مردم برزیل قرار می‌گیرد، انجام دادند. آنها غلظت متابولیت فوق را در بازه‌ی زمانی یک ساله (۲۰۱۵-۲۰۱۶) و به صورت ماهیانه اندازه‌گیری کردند. نتیجه این مطالعه حاکی از غلظت پایین MC-LR در این رودخانه بود. اما این مطالعه نشان داد که در ماه‌های مختلف سال غلظت سایر متابولیت‌ها متغیر باشد. برای مثال غلظت *Limnothrixplanctonica* بین ماه‌های ژوئن و اگوست بیشترین مقدار غلظت را داشت ($\pm 900 \text{ cells mL}^{-1}$). لازم به ذکر است که در این مطالعه ارزیابی خطرات بهداشتی انجام نشده و همچنین محققین از روش‌های الایزا و LC/MS جهت تعیین غلظت استفاده نمودند.

چند مطالعه‌ی دیگر در موزامبیک جهت تعیین غلظت متابولیت‌های MC-LR، -YR، -RR در آب آشامیدنی این کشور انجام شده که نتایج آنها نشان داد، غلظت این متابولیت‌ها بین ۶.۸۳ و $7.78 (\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$ متغیر بوده است. این مقادیر در حد بسیار بالا و ۷ برابر بیشتر از مقادیر مجاز توصیه شده توسط سازمان جهانی بهداشت بود [۱، ۱۶، ۳۰].

شاید شبیه‌ترین مطالعه با اهداف مطالعه‌ی حاضر، مطالعه‌ی ملتا و همکاران [۳۱] در برزیل است که اخیراً در زمینه‌ی ارزیابی خطر متابولیت‌های جلبکی آب شرب انجام شده است. محققین در بیشتر سناریوهایی که در این مطالعه در نظر گرفته بودند، شاخص خطر بهداشتی HQ (Hazard Quotient) بویژه برای نوزادان را در حد خطرناک برآورد کردند. آنها مقادیر مرجع جهت ارزیابی ریسک در نوزادان، کودکان، جوانان و جمعیت کلی را به ترتیب برابر با ۰.۳۰، ۱.۶۰، ۱.۶۰ و ۱ (μg L⁻¹) در نظر گرفته بودند. اما نباید این را فراموش کرد که ساختار جمعیتی در کشورهای مختلف متفاوت است. لذا ممکن است که خطرات بهداشتی متابولیت‌های جلبکی در منطقه مورد نظر در مطالعه‌ی حاضر با سایر مناطق دنیا و داخل کشور متفاوت باشد.

علاوه بر MC-LR، غلظت Geosmin و MIB نیز در برخی از مطالعات بررسی شده است. برای مثال مطالعه‌ای در جنوب استرالیا نشان داد که حداقل غلظت این متابولیتها برابر با ۱۰ (ng/l) بود که در این غلظت، ۱۰۰۰ (±۱۲٪) سلول در میلی‌لیتر وجود داشت. در این مطالعه که توسط زامیادی و همکاران [۳۲] انجام شد، همچنین نشان داده شد که بیشترین غلظت متابولیت‌های فوق به ترتیب برابر با ۱۱۴ و ۴۰ (ng/l) بود. در این مطالعه اشاره شده است که غلظت متابولیت‌ها در زمانهای مختلف در استرالیا تقریباً از یک الگوی مشابه پیروی می‌کند. اما علاوه بر زمان، مکان نمونه‌گیری نیز از ابعاد اساسی تعیین غلظت متابولیت‌ها هستند که همان طور در مطالعه‌ی فوق اشاره شده است، این غلظت‌ها در مکان‌های مختلف متفاوت است. شایان ذکر است در این مطالعه نیز همانند بسیاری از مطالعات در مورد ارزیابی خطرات بهداشتی این متابولیتها تحلیلی انجام نشده بود. مطالعه‌ی دیگری در آمریکا نشان داد که بعد از اکسیداسیون ۲۰۰۰۰ سلول سیانوباکتر *Microcystis aeruginosa* در هر میلی لیتر آب شرب، غلظت MC-LR بیشتر از مقدار مجاز توصیه شده توسط سازمان جهانی بهداشت است [۳۳]. یکی دیگر از یافته‌های این مطالعه این بود که بعد از اکسیداسیون سیانوباکتریها *Oscillatoria* و *Lyngbya* نیز غلظت Geosmin و MIB بالاتر از مقادیر آستانه بو می‌باشند.

جدی‌ترین مواجهه انسانی با سم میکروسیستین در کشور برزیل رخ داده است. در سال ۲۰۰۲ از ۱۰۶ بیمار برزیلی که تحت مداوا با دستگاه‌های همودیالیز قرار گرفتند، ۵۶ نفر از آنها به دلیل تماس با آب حاوی میکروسیستین فوت شدند [۱۹]. همچنین در اپیزود دیگری در سال ۱۹۹۶ در منطقه Caruaru کشور برزیل مواجهه ۱۲۶ بیمار دیالیزی با سم میکروسیستین صورت گرفت که ۶۰ نفر از آنها در نهایت در نتیجه نارسایی کبد مردند (۶ نفر پس از دو هفته، ۳۰ نفر پس از ۶ هفته، ۴۴ نفر پس از ده هفته و ۵۵ نفر پس از ۲۷ هفته مواجهه). غلظت میکروسیستین باند نشده (به صورت آزاد در آب) ۱۹.۵ μg/L در آب و میانگین غلظت میکروسیستین ۲۲۳ ng/g در کبد افراد مرده (اتوپسی) گزارش گردید [۳۴]. مواردی از مسمومیت‌های انسانی در مواجهه کوتاه مدت/حاد با سم میکروسیستین در نتیجه تصفیه ناکافی ذخایر آب آشامیدنی و حتی در نتیجه شنا در آب‌های حاوی میکروسیستین در کشورهای متعدد دنیا رخ داده است [۶].

۲- فصل دوم: روش کار

۲-۱- معیارهای ورود به مطالعه

در این مطالعه آب شرب شبکه توزیع شهر سنندج مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین معیارهای ورود شامل نمونه‌های آب ورودی و خروجی تصفیه خانه و نمونه‌های آب در نقاط مختلف شبکه‌ی توزیع آب شرب شهر سنندج تعیین گردیده است.

۲-۲- معیارهای خروج از مطالعه

در این مطالعه آب زیرزمینی و یا آب بطری شده به دلیل عدم استفاده در تامین آب شرب شهر سنندج مورد بررسی قرار نگرفته است.

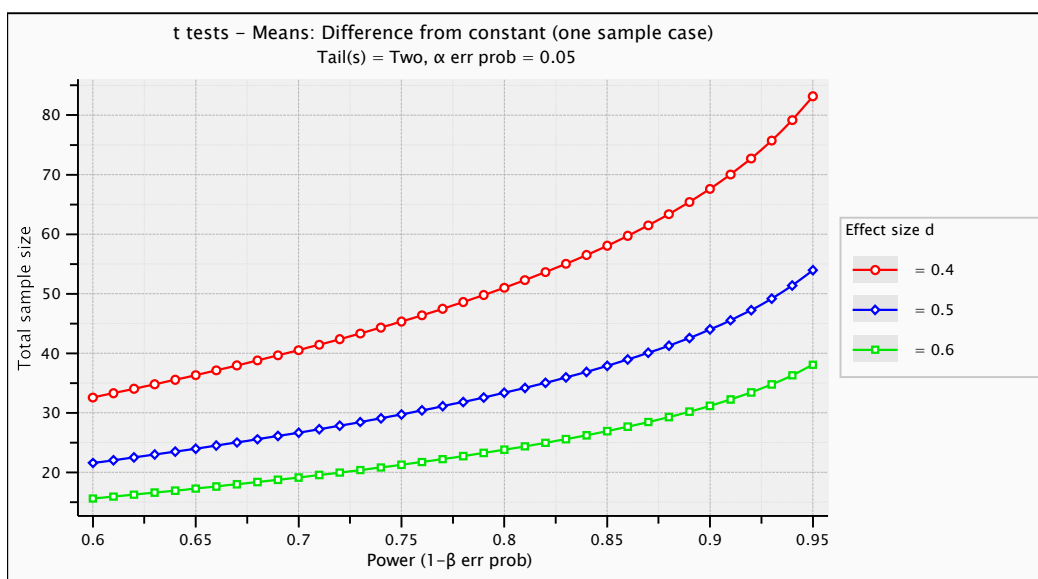
۲-۳- حجم نمونه و تعیین نقاط نمونه برداری

با توجه به اینکه یکی از اهداف مهم مطالعه‌ی حاضر ارزیابی خطر بهداشتی شاخص متابولیت‌های جلبکی تعیین گردیده است، لذا بر اساس شاخص HQ حجم نمونه با استفاده از استراتژی موجود در شکل یک تعیین گردید. در این روش از پارامترهای برآورد حجم نمونه در یک گروه و مقایسه آن با مقدار استاندارد استفاده می شود، که در این خصوص از مطالعه‌ی ملتا و همکاران [۳۱] استفاده گردید. در واقع اندازه اثر (effect size) مورد نظر یعنی ۰.۵۰ بر اساس این مطالعه در نظر گرفته شد. اما به دلیل تفاوت مطالعات مختلف، اندازه اثر ۰.۱ واحد کمتر و ۰.۱ واحد بیشتر نیز بررسی شد. در نهایت با توجه به موقعیت تصفیه خانه آب، موقعیت مخازن ذخیره آب و همچنین اطلاعات دریافتی از شرکت آب و فاضلاب شهر سنندج در خصوص طول کل خطوط اصلی، فرعی و انشعابات شبکه آب شهر سنندج که ۱۳۹۷ کیلومتر می باشد و نیز نوع طراحی شبکه (حلقوی) و در نهایت محدودیت های مالی، در مجموع ۱۱ ایستگاه نمونه برداری انتخاب و در چهار فصل مختلف (از بهار ۱۴۰۳) مورد بررسی قرار گرفت. کد ایستگاههای مورد بررسی به همراه آدرس در جدول ۵ ارائه گردیده است.

شایان ذکر است در سالهای قبل منبع تامین آب شرب شهر سنندج سد قشلاق بوده که مطابق گزارشات شرکت آب منطقه ای و آب و فاضلاب استان دچار تغذیه گرایشی شده و طعم و بوی حاصله با فرآیندهای متداول و موجود تصفیه خانه به صورت کامل حذف نشده که این امر باعث نارضایتی و اعتراض مصرف کنندگان شد، در نهایت منبع تامین آب خام به سد آزاد تغییر یافت و لذا در زمان انجام این مطالعه منبع اصلی تامین آب خام شهر سنندج سد آزاد بوده ولیکن به دلایل تعمیرات، ناترازی انرژی در خصوص ایستگاههای پمپاژ و ... از سد قشلاق نیز به صورت ترکیبی، موردی استفاده می گردد. در کنار تصفیه خانه سنندج روستای قلیان قرار دارد که به صورت مجزا دارای تصفیه خانه متداول بوده که منبع تامین آب خام آن سد قشلاق می باشد و لذا در این مطالعه جهت بررسی وضعیت کیفیت آب سد قشلاق آب این روستا هم مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۵- کد ایستگاههای نمونه برداری و آدرس

شماره نمونه	محل نمونه برداری
۱	ورودی تصفیه‌خانه روستای قلیان
۲	خروجی تصفیه‌خانه قلیان
۳	شبکه توزیع روستای قلیان (انتهای شبکه قلیان)
۴	ورودی تصفیه‌خانه آب سنندج
۵	خروجی تصفیه‌خانه آب سنندج
۶	شهرک بعثت (نزدیک مخازن دوقلوی فیض آباد)
۷	میدان انقلاب
۸	شهرک وحدت
۹	دوشان
۱۰	نایسر
۱۱	شهرک بهاران



شکل ۱- محاسبه حجم نمونه بر اساس شاخص HQ

۲-۴- روش نمونه برداری و آنالیز آلاینده ها

در این مطالعه نمونه برداری از آب ورودی و خروجی تصفیه خانه و نقاط مختلف شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در طی یک سال و همچنین آماده سازی و آنالیز آنها مطابق دستورالعمل مندرج در کتاب استاندارد متد جهت انجام آزمایشهای آب و فاضلاب صورت گرفت. [35]. بر این اساس آنالیز میکرو سیستمین LR به عنوان شاخص سموم جلبکی، با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) با دکتور UV-vis انجام شد. به دلیل

غلطت بسیار پایین سم مذکور در نمونه های آب، با استفاده از روش استخراج فاز جامد (SPE) و به کمک کارتریجهای HLB تغلیظ نمونه ها انجام گردید (پیوست یک) [۱۷، ۳۵]. جهت آنالیز ترکیبات ژئوزمین و ۲ - متیل ایزبورنئول از دستگاه گاز کروماتوگراف طیف سنج جرمی (GC-MS) استفاده شد و از روش استخراج مایع - مایع (LLE) جهت استخراج و پیش تغلیظ این نمونه ها استفاده گردید (پیوست ۲) [19]. فلزات سنگین شاخص مطابق اهداف با استفاده از دستگاه طیف سنجی نشر نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) مدل Thermo Scientific Pro-XP ICP-OES Due تعیین مقدار گردید. سایر پارامترهای تعریف شده در این طرح مطابق روش استاندارد مطابق دستورالعمل مندرج در کتاب استاندارد متد جهت انجام آزمایشهای آب و فاضلاب انجام شد [۱، ۳۵].

۲-۵- محاسبات ارزیابی ریسک بهداشتی

در این مطالعه جهت ارزیابی خطر سم میکرو سیستمین ال آر به عنوان شاخص سموم جلبکی بر روی بزرگسالان و کودکان، از مدل ارزیابی خطر سلامتی سازمان محیط زیست ایالت متحده (USEPA) استفاده شد. این ماده سمی از مسیرهای پوستی و گوارشی وارد بدن می شود. مسیر گوارشی سهم اصلی را در ورود این سم به بدن دارد و مسیر پوستی سهم ناچیزی دارد. روابط محاسبه دوز متوسط روزانه مزمن (CDI)، شاخص خطر غیر سرطان زایی (HQ) و شاخص خطر سرطان زایی (ELCR) دریافت گوارشی سم میکرو سیستمین ال آر در ادامه ارائه گردیده است [1, 2, 36].

$$CDI_{Oral} = \frac{C_i \cdot RBA \cdot IR \cdot ED \cdot EF}{BW \cdot AT} \quad (1)$$

که در آن:

CDI: دوز متوسط روزانه مزمن ($\mu\text{g} / \text{kg} \cdot \text{day}$) سم میکرو سیستمین ال آر

Ci: غلظت سم میکرو سیستمین ال آر در منبع آب ($\mu\text{g}/\text{L}$)

IR: نرخ ورود روزانه آب آشامیدنی به بدن (۲ لیتر برای بزرگسالان و ۱ لیتر برای کودکان)

ED: دوره مواجهه (۷۰ سال برای بزرگسالان و ۱۰ سال برای کودکان)

EF: فراوانی مواجهه (۳۶۵ روز سال)

RBA: ضریب نسبی در دسترسی زیستی (Relative Biological Availability): این پارامتر برای متابولیت های خوراکی معمولاً کمتر از ۱ است و به میزان جذب ماده در دستگاه گوارش اشاره دارد. مقدار آن در صورت عدم داده یک می باشد.

BW: میانگین وزن بدن (۶۰ کیلوگرم برای بزرگسالان و ۱۵ کیلوگرم برای کودکان)

AT: متوسط روزهای زندگی (۲۵۵۵۰ روز برای بزرگسالان و ۳۶۵۰ روز برای کودکان)

- برای تعیین ریسک غیرسرطانی مواجهه انسانی با سم میکروسیستین ال آر از شاخص HQ (رابطه ۲) استفاده می شود.

$$HQ_i = \frac{CDI}{RfD_i} \quad (2)$$

که در آن:

RfD: دز مرجع حداکثر مواجهه (میکروگرم بر کیلوگرم در روز) است و مقدار آن براساس اطلاعات ریسک، وابسته به WHO تعیین می شود [۱]. این پارامتر که اغلب به آن ADI (Acceptable Daily Intake) یا RfD (Reference Dose) گفته می شود، بالاترین دوز روزانه ای است که WHO معتقد است انسان ها در طول عمر خود می توانند بدون هیچ گونه خطر قابل توجهی در معرض آن قرار بگیرند. این مقدار برای سم میکروسیستین ال آر $0.04 \mu\text{g/kg bw/day}$ تعیین شده است.

رده بندی مقادیر HQ بدین صورت است که اگر HQ کوچکتر از یک باشد ماده سمی هیچ گونه اثر منفی بر روی سلامتی ندارد و اگر این شاخص بزرگتر از یک باشد احتمال بروز اثرات غیر سرطانی در اثر مصرف آشامیدنی آب را نشان می دهد.

خطر سرطان اضافی نشان دهنده احتمال خطرات سلامتی ناشی از مواجهه با عوامل سرطان زا در طول زندگی یک فرد می باشد که با استفاده از دو پارامتر دوز متوسط روزانه مزمن (CDI) و فاکتور شیب (SF) محاسبه می شود. ریسک سرطان اضافی ناشی از سم میکروسیستین ال آر از طریق مسیر گوارشی در طول زندگی فرد (ELCR) از رابطه سه تعیین می شود.

$$ELCR_{\text{Oral}} = CDI \cdot SF_{\text{Oral}} \quad (3)$$

که در آن SF فاکتور شیب سرطان زایی سم میکروسیستین ال آر به صورت گوارشی است که مطابق EPA مقدار آن $1 \times 10^{-3} \mu\text{g/kg/day}$ تعیین گردیده است. مقادیر $ELCR < 10^{-6}$ بدون خطر قابل توجه، $10^{-6} \leq ELCR \leq 10^{-4}$ قابل قبول در محدوده مدیریتی و مقادیر $ELCR > 10^{-4}$ نیازمند اصلاح فوری و اقدام جهت کاهش خطر میباشد. جهت رسم نمودارها و تجزیه و تحلیل داده ها از نرم افزار Excel استفاده گردید.

۳- فصل سوم: نتایج و یافته ها

در این بخش در ابتدا نتایج حاصل از آنالیز پارامترهای متداول کیفی آب، فلزات سنگین شاخص و متابولیت های آب آشامیدنی شهر سنندج در قالب جداول شماره ۶ تا ۹ و نمودارهای شماره ۲ تا ۲۰ ارائه و در ادامه نتایج حاصل از ارزیابی ریسک بهداشتی سم میکروسیستین LR ارائه می گردد.

جدول شماره ۶- نتایج آزمایشات مرحله اول

نمونه آنالیز	نمونه شماره ۱	نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۳	نمونه شماره ۴	نمونه شماره ۵	نمونه شماره ۶	نمونه شماره ۷	نمونه شماره ۸	نمونه شماره ۹	نمونه شماره ۱۰	نمونه شماره ۱۱
pH	8.02	7.09	7.87	8.18	8.08	8.16	8.11	8.12	7.81	7.83	8.11
کلر باقیمانده (mg/L)	0	0.5	0.4	0	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.3
کدورت (NTU)	1.13	0.8	0.36	1.48	0.51	1.04	0.8	0.93	1.12	1.05	0.3
UV 254	0.018	0.016	0.005	0.037	0.018	0.027	0.025	0.015	0.030	0.029	0.022
نیترات (mg/l)	2.5	2.3	2.2	6.0	5.4	5.2	5.1	5.0	5.3	4.7	5.5
مس (ppm)	0.92	0.83	0.71	1.02	0.75	0.91	0.35	0.64	0.52	0.67	0.51
روی (ppm)	1.03	0.94	0.91	1.05	0.91	1.02	1.01	0.85	0.71	0.82	0.69
آهن (ppm)	0.17	0.15	0.09	0.16	0.14	0.11	0.16	0.13	0.11	0.12	0.11
منگنز (ppm)	0.087	0.071	0.061	0.075	0.058	0.068	0.070	0.081	0.080	0.078	0.076
سرب (ppb)	3.21	2.06	2.01	3.01	2.01	2.05	2.05	2.04	2.01	1.98	1.84
کادمیوم (ppb)	1.35	1.02	1.06	1.54	1.06	1.02	0.84	0.96	1.06	1.27	1.08
کروم (ppb)	10.06	8.02	7.35	8.21	7.45	3.26	5.21	5.41	6.27	3.41	5.61
آرسنیک (ppb)	2.64	1.81	1.96	2.71	2.63	1.98	2.09	2.56	1.47	2.08	2.72
Micricystin (MC-LR)(µg/l)	0.23	0.4	0.37	0.17	N.D	N.D	N.D	N.D	0.2	N.D	0.33
Geosmin (ng/l)	1.3	1.9	1	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	2.1
2-MIB (ng/l)	3	4.1	2	0.8	1.1	1.5	N.D	N.D	0.5	N.D	3.3
TOC (mg/L)	3.1	2.75	2.70	2.9	2.7	2.7	2.5	2.6	2.4	2.5	2.6
کلروفیل آ	0.91	N.D	N.D	0.83	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
طعم و بو (TON)	4	2.5	2.9	3	1.5	1.8	1.4	1.7	1.6	1.6	2.1

جدول شماره ۷- نتایج آزمایشات مرحله دوم

شماره ۱۱ نمونه	شماره ۱۰ نمونه	نمونه شماره ۹	نمونه شماره ۸	نمونه شماره ۷	نمونه شماره ۶	نمونه شماره ۵	نمونه شماره ۴	نمونه شماره ۳	نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۱	آنالیز / نمونه
7.94	7.77	7.9	8.09	8.06	8.07	8.14	8.00	8.19	8.05	8.18	pH
0.2	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0	0.4	0.4	0	کلر باقیمانده (mg/L)
0.16	0.01	0.3	0.34	0.16	0.58	0.11	0.48	0.4	0.65	0.7	کدورت (NTU)
0.021	0.015	0.026	0.025	0.029	0.029	0.025	0.033	0.036	0.029	0.028	UV 254
4.7	4.3	4.7	4.5	4.6	4.7	4.9	5.4	2.7	2.8	2.9	نیترات (mg/l)
0.72	0.64	0.47	0.56	0.95	0.92	0.63	0.98	0.71	0.64	1.01	مس (ppm)
1.06	0.61	1.03	0.98	0.92	0.97	0.89	1.06	1.05	1.03	2.09	روی (ppm)
0.11	0.12	0.18	0.11	0.03	0.11	0.16	0.20	0.12	0.21	0.41	آهن (ppm)
0.052	0.036	0.069	0.059	0.051	0.039	0.054	0.069	0.031	0.070	0.090	منگنز (ppm)
1.06	1.21	1.64	1.25	1.08	1.92	2.03	2.39	2.06	2.31	4.98	سرب (ppb)
1.05	0.93	0.96	0.92	0.61	0.44	0.71	1.05	0.54	0.96	1.08	کادمیوم (ppb)
4.06	6.07	5.08	4.09	5.06	6.07	5.02	6.32	5.61	5.64	7.09	کروم (ppb)
2.03	1.94	2.06	2.01	1.94	1.71	0.63	2.06	1.23	1.98	3.84	آرسنیک (ppb)
0.34	N.D	0.22	N.D	N.D	N.D	N.D	0.19	0.41	0.32	0.25	Micricystin (MC-LR)(µg/l)
1.4	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	2.5	1.6	1.4	Geosmin (ng/l)
3.5	N.D	N.D	N.D	N.D	1	1.1	N.D	3.7	3.9	2.7	2-MIB (ng/l)
1.5	1.8	1.6	1.8	1.7	1.6	1.8	2.2	2	2.2	2.5	TOC (mg/L)
N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.87	N.D	N.D	0.95	کلروفریل آ
2	1.8	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	3.2	2.7	2.3	3.8	طعم و بو (TON)

جدول شماره ۸ - نتایج آزمایشات مرحله سوم

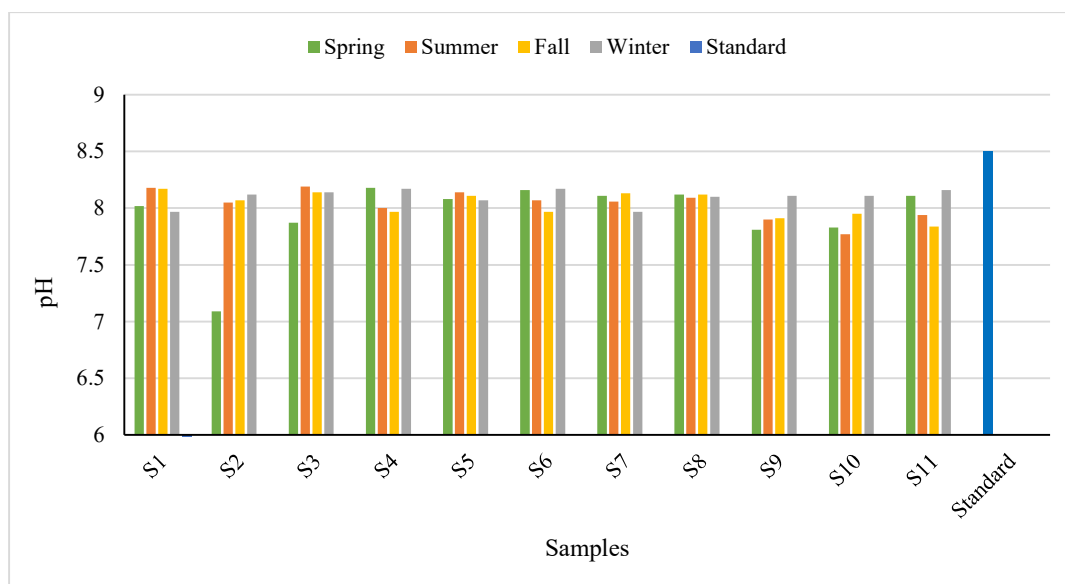
نمونه شماره ۱۱	نمونه شماره ۱۰	نمونه شماره ۹	نمونه شماره ۸	نمونه شماره ۷	نمونه شماره ۶	نمونه شماره ۵	نمونه شماره ۴	نمونه شماره ۳	نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۱	نمونه آنالیز
7.84	7.95	7.91	8.12	8.13	7.97	8.11	7.97	8.14	8.07	8.17	pH
0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0	0.4	0.5	0	کلر باقیمانده (mg/L)
0.19	0.25	0.20	0.19	0.17	0.27	0.23	0.34	0.2	0.35	0.62	کدورت (NTU)
0.031	0.03	0.04	0.03	0.031	0.03	0.03	0.05	0.046	0.05	0.04	UV 254
1.8	2	2	2	1.7	2	2	2.2	1.1	1.1	1.4	نیترات (mg/l)
0.96	1.08	1.00	1.07	1.09	1.05	0.63	1.03	0.96	0.81	1.09	مس (ppm)
2.01	1.88	1.50	1.08	1.06	0.97	0.89	1.36	1.09	0.96	3.01	روی (ppm)
0.35	0.33	0.45	0.38	0.45	0.56	0.23	0.61	0.45	0.54	0.67	آهن (ppm)
0.069	0.068	0.065	0.066	0.069	0.084	0.053	0.094	0.073	0.082	0.097	منگنز (ppm)
2.09	2.01	2.06	2.09	2.06	1.95	2.03	3.08	3.04	1.98	4.65	سرب (ppb)
0.65	0.73	0.85	0.78	0.81	0.67	0.94	1.54	0.78	1.06	2.07	کادمیوم (ppb)
1.84	5.08	5.04	5.01	5.08	5.63	5.03	5.69	4.91	4.69	6.31	کروم (ppb)
2.03	1.35	1.60	1.05	1.05	1.25	1.05	2.67	0.84	2.07	3.06	آرسنیک (ppb)
N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.56	N.D	0.82	0.65	1.02	1.1	Micricystin (MC-LR)(μg/l)
N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	1.1	1.7	1.8	Geosmin (ng/l)
N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.5	N.D	0.7	2.1	3.2	3.5	2-MIB (ng/l)
1.9	1.8	1.6	1.7	1.8	1.6	1.8	2.1	1.59	1.65	2.9	TOC (mg/L)
N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	1.1	N.D	N.D	1.2	کلروفیل آ
1.9	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9	1.6	3	2.6	2.5	3.7	طعم و بو (TON)

جدول شماره ۹- نتایج آزمایشات مرحله چهارم

نمونه	آنالیز	نمونه شماره ۱	نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۳	نمونه شماره ۴	نمونه شماره ۵	نمونه شماره ۶	نمونه شماره ۷	نمونه شماره ۸	نمونه شماره ۹	نمونه شماره ۱۰	نمونه شماره ۱۱
pH		7.97	8.12	8.14	8.17	8.07	8.17	7.97	8.10	8.11	8.11	8.16
کلر باقیمانده (mg/L)		0	0.7	0.4	0	0.6	0.5	0.4	0.3	0.4	0.2	0.2
کدورت (NTU)		1.1	0.6	0.26	0.95	0.14	0.26	0.56	0.55	0.35	0.20	0.06
UV 254		0.027	0.02	0.015	0.029	0.02	0.021	0.021	0.019	0.020	0.016	0.017
نیترات (mg/l)		1.5	1.2	1.2	1.4	1.3	1.1	1.2	1.3	1.2	1.1	1.3
مس (ppm)		1.25	0.81	0.84	1.09	0.37	1.04	0.84	0.82	0.71	0.90	0.92
روی (ppm)		2.07	0.84	1.06	2.03	1.35	1.05	1.05	0.77	1.03	1.12	0.67
آهن (ppm)		0.81	0.24	0.56	0.65	0.34	0.31	0.32	0.29	0.30	0.32	0.24
منگنز (ppm)		0.091	0.061	0.084	0.089	0.063	0.081	0.084	0.074	0.080	0.055	0.064
سرب (ppb)		5.04	1.94	3.08	2.06	2.01	3.07	2.06	2.90	2.88	3.00	3.07
کادمیوم (ppb)		1.34	0.67	1.03	1.07	0.89	0.94	0.97	0.90	0.91	0.93	0.94
کروم (ppb)		6.34	1.97	4.97	5.61	3.96	4.63	4.27	4.29	4.11	4.40	4.26
آرسنیک (ppb)		2.31	1.36	1.09	1.98	1.37	1.04	1.25	1.62	1.37	1.55	1.72
Micricystin (MC-LR)(µg/l)		0.22	0.28	0.39	0.16	0.12	0.11	0.08	N.D	N.D	N.D	0.07
Geosmin (ng/l)		1.3	1.5	2.1	0.8	0.7	0.3	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
2-MIB (ng/l)		2.4	3.7	3.3	0.4	1	1	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
TOC (mg/L)		2.8	2.65	2.58	2.4	2.3	2.1	2.3	2.0	1.8	2.2	2.3
کلروفیل آ		1.4	N.D	N.D	1.5	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
طعم و بو (TON)		3.5	2.1	2.7	2.8	1.5	1.7	1.6	1.8	1.5	1.8	2.1

۳-۱- pH:

نتایج حاصل از آزمایش pH آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل ۲ ارائه گردیده است. همانگونه که مشهود است مقادیر pH در اکثر نقاط و فصول در محدوده ۷.۰۹ تا ۸.۱۹ قرار دارند. این محدوده به طور کلی نشان دهنده آب نسبتاً قلیایی است، که در بسیاری از منابع آب طبیعی مشاهده می‌شود. محدوده استاندارد pH آب آشامیدنی بر اساس استاندارد ملی (1053) بین ۶.۵ تا ۸.۵ است و لذا کلیه نمونه‌های آنالیز شده در فصول مختلف در محدوده استاندارد قرار دارند. pH آب یکی از پارامترهای کلیدی کیفیت آب است بنحویکه pH پایین (اسیدی) می‌تواند باعث خوردگی لوله‌ها و آزاد شدن فلزات سنگین در آب شود، که برای سلامتی مضر است، همچنین pH بسیار بالا (قلیایی) نیز می‌تواند طعم آب را تحت تأثیر قرار داده و باعث رسوب‌گذاری گردد.

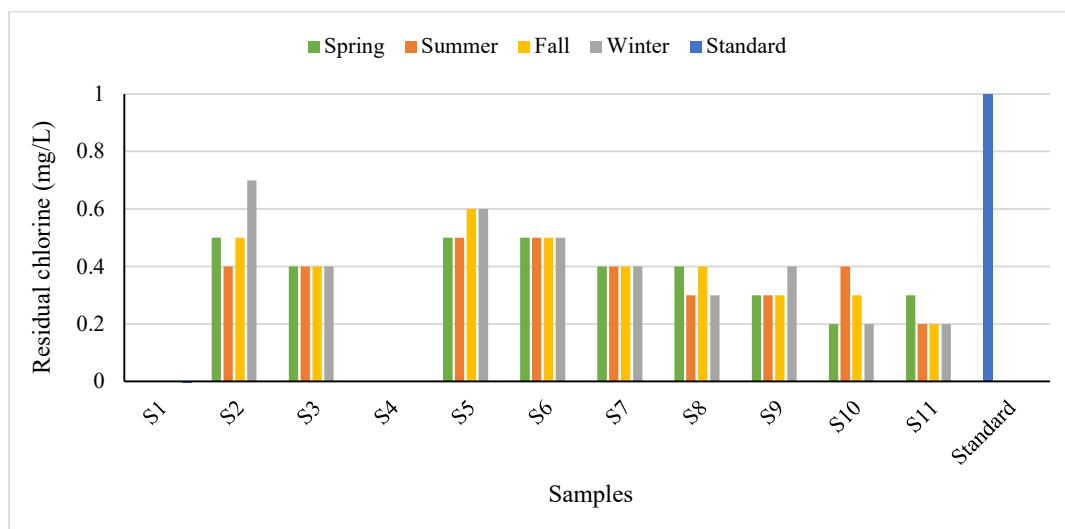


شکل ۲- نتایج آزمایش pH آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۲- کلر باقیمانده:

نتایج حاصل از اندازه‌گیری کلر باقیمانده آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۳ ارائه گردیده است. بر این اساس مقادیر مشاهده شده بین ۰/۲ تا ۰/۷ میلی گرم بر لیتر متغیر است و بنابراین کلر باقیمانده در سطحی مناسب برای گندزدایی اولیه قرار دارد، اما در برخی نقاط پایین‌تر از حد مطلوب پایدارسازی کلر (کمتر از ۰/۵ mg/L) است. بر اساس استاندارد ملی (۱۰۱۱) کلر آزاد باقیمانده پس از حداقل نیم ساعت تماس در شرایط عادی (در انتهای شبکه آب رسانی) باید بین ۰/۵ تا ۰/۸ میلی گرم بر لیتر و در شرایط همه‌گیری بیماری‌های روده‌ای یک میلی گرم بر لیتر باشد. با توجه به مقادیر کلر باقیمانده در خروجی دو تصفیه‌خانه قلیان و سنندج (ایستگاه ۲ و ۵) و

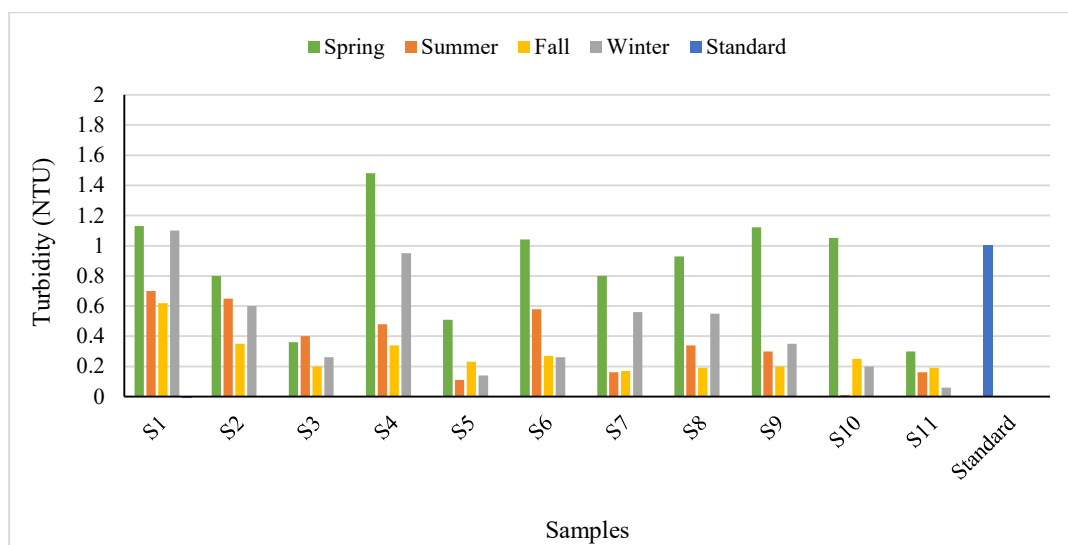
مقادیر کلر باقیمانده در نقاط مختلف شبکه نشان از کلر خواهی یا مصرف کم کلر به دلیل غلظت کم مواد آلی در آب دارد. البته با افزایش زمان ماند در انتهای شبکه (ایستگاه ۱۱ بهاران) مقدار مصرف کلر مشهود است.



شکل ۳- نتایج آزمایش کلر باقیمانده آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۳-۳- کدورت:

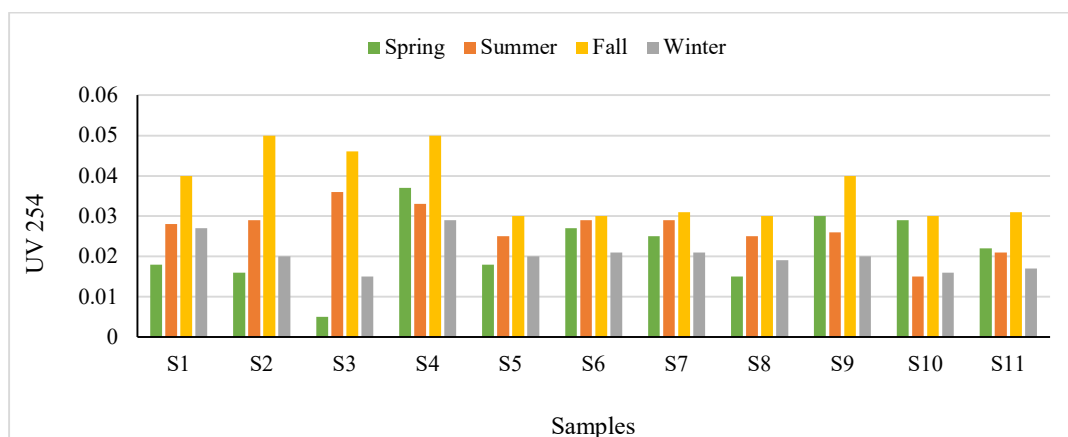
نتایج حاصل از اندازه گیری کدورت آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۴ ارائه گردیده است. همانطوریکه مشهود است مقدار کدورت در اکثر نقاط شبکه کمتر از حد استاندارد ۱ NTU یا در برخی موارد در حد مرزی آن است. همچنین بالاترین کدورت‌ها عمدتاً در فصل بهار مشاهده شده که می‌تواند ناشی از افزایش جریان‌های سطحی، رواناب‌ها و ورود مواد معلق به منابع آب در اثر بارندگی باشد. در تابستان و پاییز معمولاً مقادیر کدورت کاهش یافته و در محدوده‌ی ۰/۲ تا ۰/۶ NTU قرار دارند، در زمستان نیز مقداری بین ۰/۴ تا ۰/۸ NTU دیده می‌شود. بر اساس استاندارد ملی (۱۰۵۳) در آبهای صاف سازی شده کدورت نباید بیش از یک واحد نفلومتری باشد و در هیچ زمانی میزان کدورت نباید بیش از ۵ NTU باشد.



شکل ۴- نتایج آزمایش کدورت آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۴- شاخص UV_{254} :

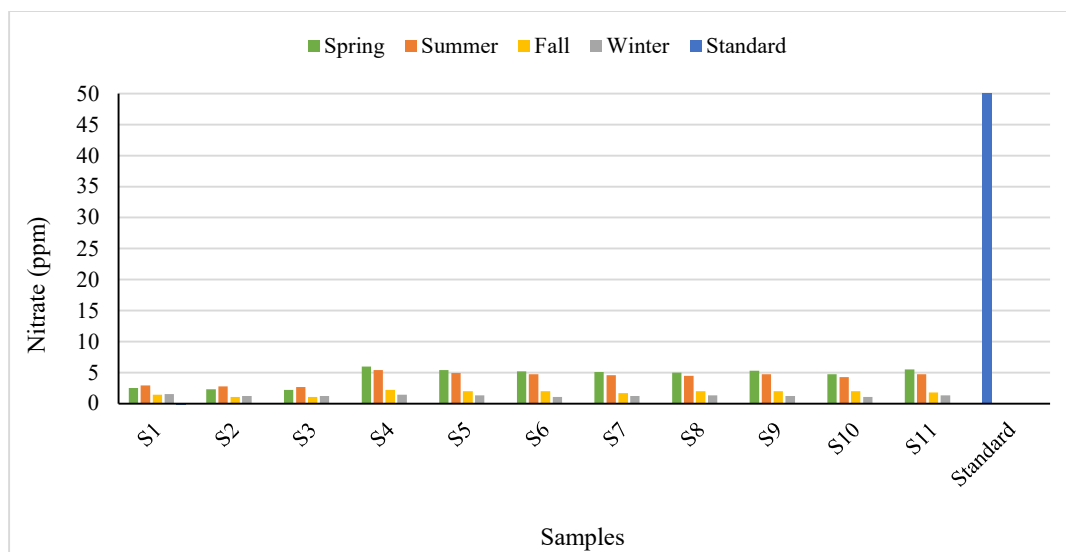
نتایج حاصل از اندازه گیری شاخص UV_{254} آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۵ ارائه گردیده است. همانطوریکه مشهود است شاخص UV_{254} در آب شرب سنندج در محدوده ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۵ متغیر است و نشان دهنده آن است که میزان مواد آلی محلول در حد مجاز و قابل قبول است. بیشترین تغییرات فصلی در ورودی تصفیه خانه ها مشاهده می شود و سیستم تصفیه توانسته است این نوسانات را در آب خروجی تا حد زیادی کاهش دهد. بنابراین کیفیت آب در شبکه توزیع نسبتاً پایدار و مطلوب است و هیچ نشانه ای از افزایش مواد آلی در مسیر دیده نمی شود. شاخص UV_{254} مقدار جذب نور فرابنفش با طول موج ۲۵۴ نانومتر را بیان می کند و معمولاً برای سنجش میزان مواد آلی محلول در آب (مانند ترکیبات آلی طبیعی و مواد پیش ساز تشکیل تری هالومتان ها) استفاده می شود. هرچه این شاخص بزرگ تر باشد، مقدار مواد آلی در آب بیشتر است.



شکل ۵- نتایج آزمایش شاخص UV_{254} آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۵-نیترات:

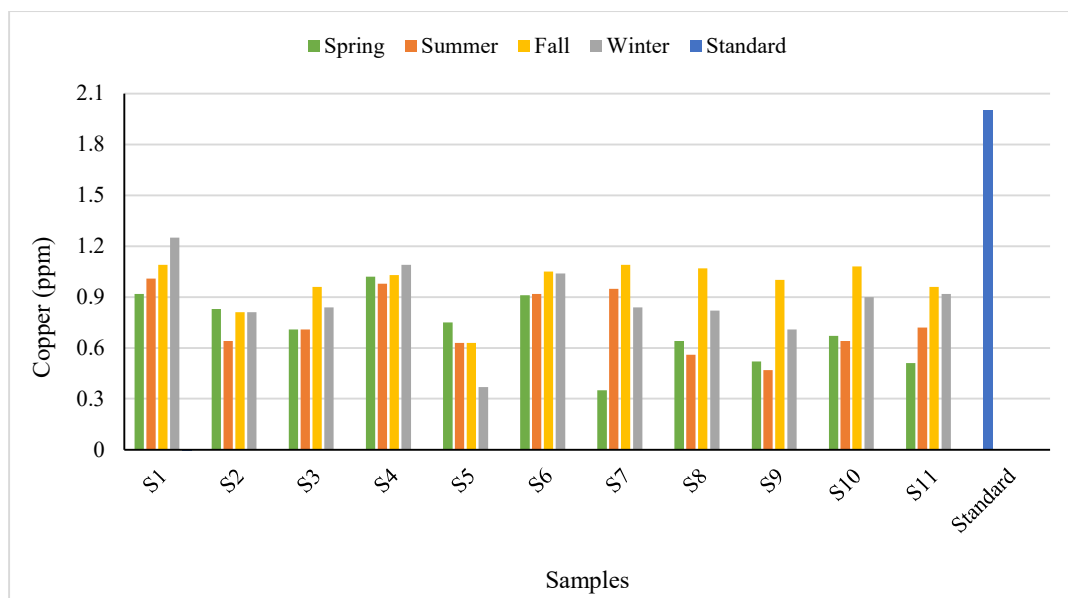
نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت نیترات آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۶ ارائه گردیده است. بر این اساس حداقل مقدار نیترات ۱/۱ و حداکثر ۶ میلی گرم بر لیتر تعیین گردیده است. مقدار نیترات در تمامی نمونه‌ها S1 تا S11 به مراتب کمتر از حد استاندارد ملی و WHO یعنی ۵۰ میلی گرم بر لیتر می باشد. این موضوع نشان می‌دهد که آب شرب شهر سنندج از نظر نیترات در محدوده ایمن و بهداشتی قرار دارد و خطر سمیت نیترات برای انسان (مثل متهموگلوبینمی در نوزادان) وجود ندارد. همچنین تغییرات فصلی طبیعی‌اند و در حدی نیستند که نشانگر آلودگی شدید باشند و نتیجه نهایی اینکه عملکرد تصفیه‌خانه‌های قلیان و سنندج با توجه به نوع فرآیندهای متداول در کاهش نیترات چندان مؤثر نبوده است. شایان ذکر است غلظت پایین نیترات در شبکه آب شهر سنندج به دلیل تامین آب از منابع آب سطحی بوده و آب زیر زمینی استفاده نمی گردد.



شکل ۶- نتایج آزمایش نیترات آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۶-مس:

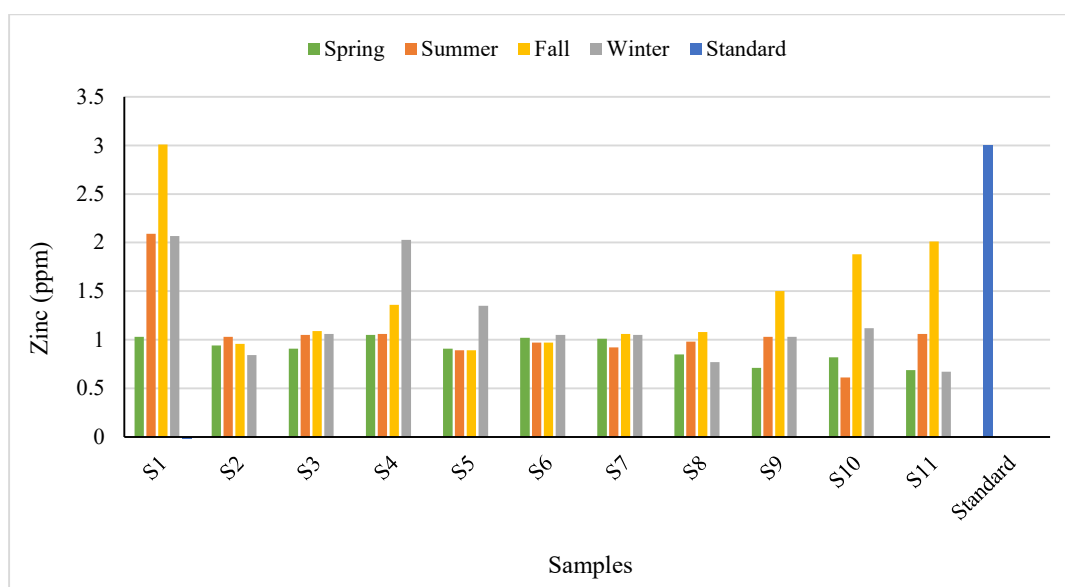
شکل شماره ۷ نمودار غلظت مس (Copper) را در آب شرب شهر سنندج در ۱۱ ایستگاه نمونه‌برداری و در چهار فصل سال نشان می‌دهد. همچنین ستون آبی نمایانگر حد استاندارد مجاز ۲ ppm برای مس در آب آشامیدنی طبق استاندارد WHO و استاندارد ملی ایران است. بر این اساس غلظت مس در همه‌ی ایستگاه‌ها در محدوده‌ی ۰/۳۵ تا ۱/۲ ppm قرار دارد. بنابراین میزان مس در هیچ یک از نمونه‌ها (حتی در آب خام ورودی به تصفیه‌خانه‌ها) بالاتر از حد استاندارد نیست و در نتیجه، آب شرب سنندج از نظر عنصر مس ایمن و سالم است، تغییرات مشاهده‌شده بیشتر ناشی از شرایط فصلی و نوع لوله‌هاست و نه منبع تأمین آب.



شکل ۷- نتایج آزمایشات غلظت مس آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۷- روی

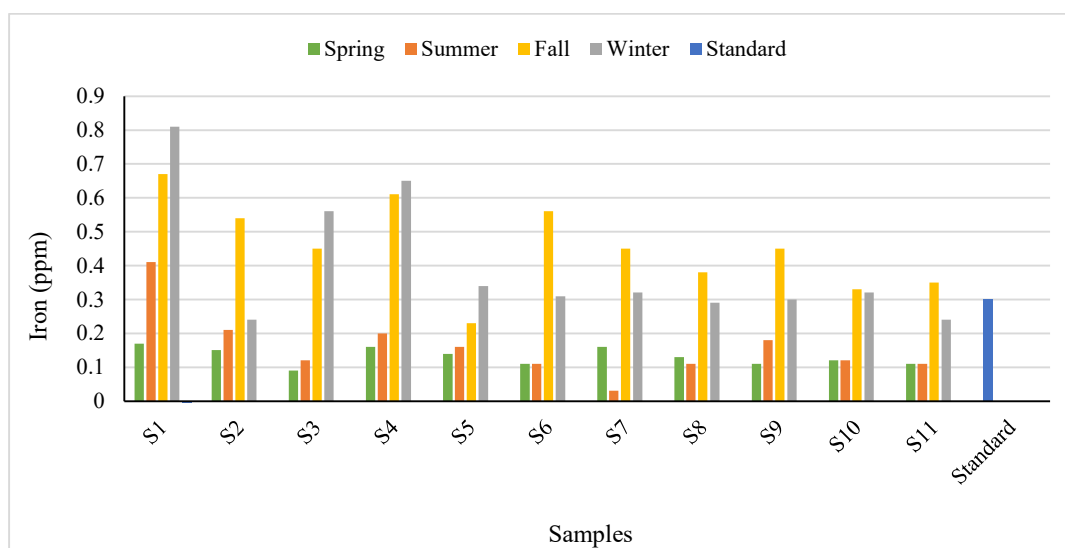
نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت فلز روی در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۸ ارائه گردیده است. حداقل مقدار این پارامتر ۰/۶۱ و حداکثر آن ۳/۰۱ ppm (البته در آب خام ورودی تصفیه خانه قلیان) تعیین مقدار گردیده است. مطابق استاندارد ملی ایران (۱۰۵۳) حداکثر مقدار مجاز این فلز در آب آشامیدنی ۳ ppm است. همان طور که در نمودار دیده می شود، هیچ کدام از نمونه ها در هیچ یک از فصول از مقدار استاندارد تجاوز نکرده اند. پاییز فصلی است که بیشترین تغییرات را نشان می دهد و باید پایش بیشتری در آن انجام شود. عملکرد تصفیه خانه ها مناسب بوده و آب خروجی آن ها از نظر روی در محدوده ایمن قرار دارد. پیشنهاد می شود در نقاط با افزایش نسبی یعنی S10 و S11، منشأ احتمالی فلز بررسی و در صورت لزوم جنس لوله ها ارزیابی گردد.



شکل ۸- نتایج آزمایشات غلظت روی آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۸- آهن:

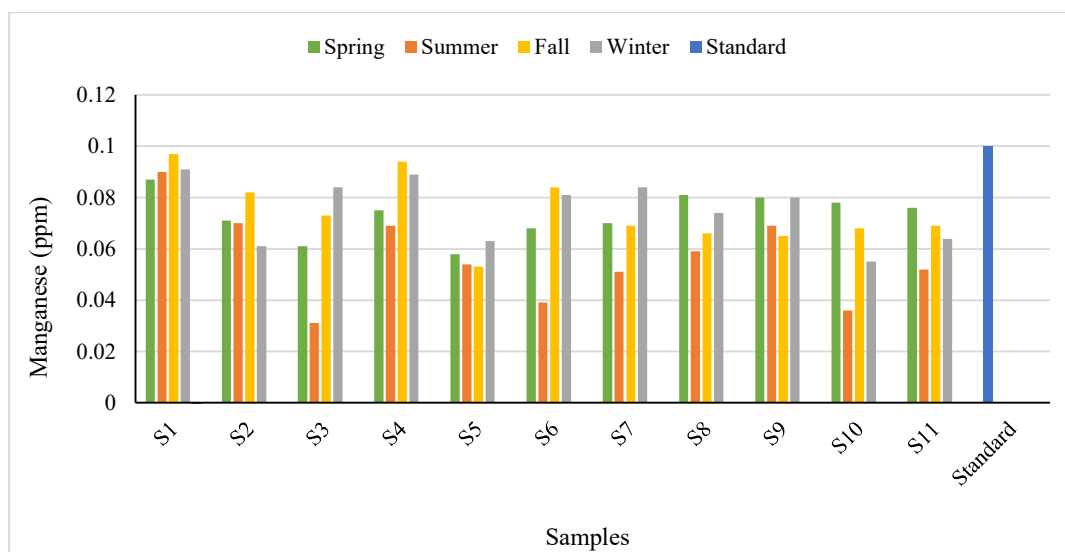
نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت فلز آهن در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۹ ارائه گردیده است. حداقل مقدار این پارامتر ۰/۰۳ و حداکثر آن ۰/۵۶ ppm در شبکه آب شرب شهر سنندج تعیین مقدار گردیده است. البته در آب خام ورودی تصفیه خانه ها این مقادیر بیشتر و تا ۰/۸ ppm هم تعیین گردیده است. مطابق استاندارد ملی ایران (۱۰۵۳) حداکثر مقدار مجاز این فلز در آب آشامیدنی ۰/۳ ppm است. همانطور که مشهود است در اکثر نقاط در فصول مختلف غلظت آهن در شبکه کمتر از حد مجاز است ولی در برخی ایستگاهها بویژه در فصل پاییز مقدار آهن بالاتر از حد مجاز تعیین شده است. علاوه بر غلظت بالای این فلز در منبع آب خام و خوردگی لوله های ، یکی از دلایل مهم افزایش آهن در شبکه آب شرب شهر سنندج ، استفاده از منعقد کننده کلروفریک در برخی مواقع بجای پلی آلومنیوم کلراید می باشد. بر اساس داده های اخذ شد از شرکت آب و فاضلاب استان در مواقع تعمیرات و نیز محدودیت های انرژی الکتریکی جهت ایستگاههای پمپاژ آب از سد آزاد تا ورودی تصفیه خانه، از منبع جایگزین (الترناتیو) یعنی سد قشلاق استفاده می گردد که به دلیل تغذیه گرای، دارای مشکلات طعم و بو و متابولیت های جلبکی بوده، که در این مواقع جهت بالا بردن راندمان تصفیه خانه از کلروفریک بجای پلی آلومنیوم کلراید استفاده می گردد. و لذا این پارامتر نیاز به توجه و پایش بیشتری دارد.



شکل ۹- نتایج آزمایشات غلظت آهن آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۹- منگنز:

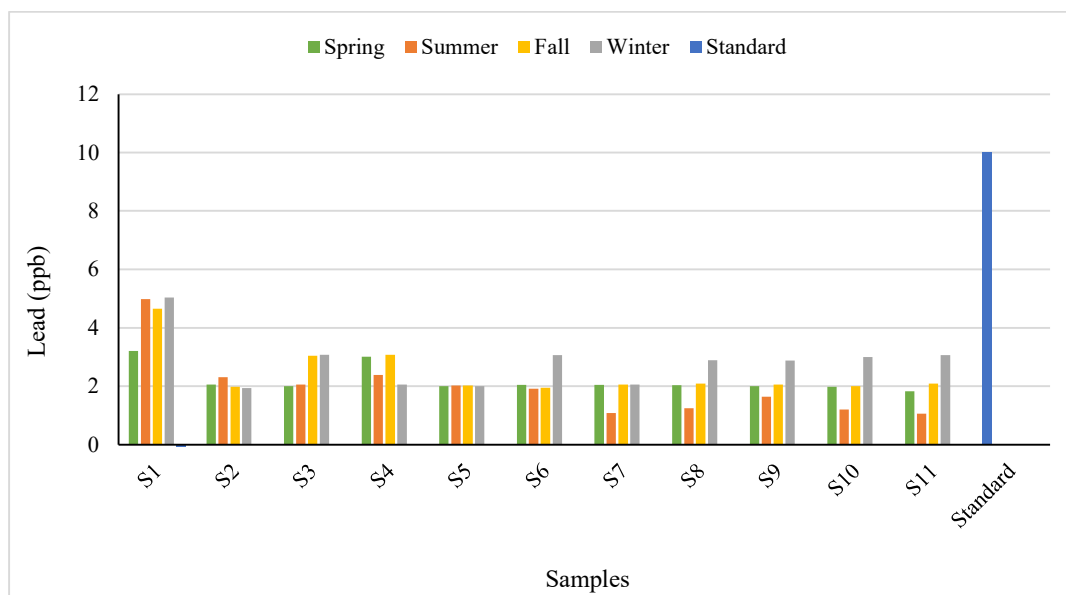
نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت منگنز در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۱۰ ارائه گردیده است. همانطوریکه مشهود است، حداقل مقدار این پارامتر ۰/۰۳۱ و حداکثر آن ۰/۰۸۴ ppm در شبکه آب شرب شهر سنندج تعیین مقدار گردیده است. البته در آب خام ورودی تصفیه خانه ها این مقادیر بیشتر و تا ۰/۰۹۷ ppm هم تعیین گردیده است. مطابق استاندارد ملی ایران (۱۰۵۳) حداکثر مقدار مجاز این فلز در آب آشامیدنی ۰/۱ ppm است. بر این اساس هیچ یک از نمونه های آب شبکه توزیع از حد استاندارد تجاوز نکرده اند. بنابراین آب تمام مناطق از نظر منگنز در محدوده ایمن و قابل قبول قرار دارد. همچنین تغییرات فصلی طبیعی است و نشانه ای از آلودگی منظم یا مزمین دیده نمی شود.



شکل ۱۰- نتایج آزمایشات غلظت منگنز آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۱۰- سرب:

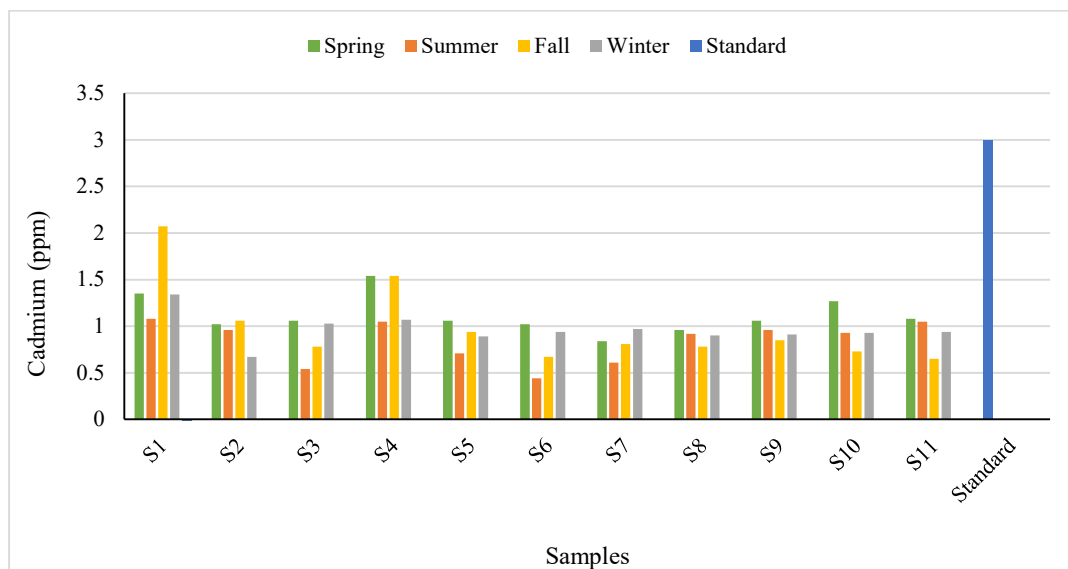
نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت فلز سرب در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۱۱ ارائه گردیده است. حداقل مقدار این پارامتر ۱/۰۶ و حداکثر آن ۳/۰۷ ppm در شبکه آب شرب شهر سنندج تعیین مقدار گردیده است. البته در آب خام ورودی تصفیه خانه ها این مقادیر بیشتر و تا ۵/۰۴ ppm هم تعیین گردیده است. مطابق استاندارد ملی ایران (۱۰۵۳) حداکثر مقدار مجاز این فلز در آب آشامیدنی ۱۰ ppm است. همانطور که مشهود است، تمام نمونه ها کمتر از حد اکثر مجاز این فلز هستند، بنابراین از نظر سرب، آب تمام نقاط شبکه ایمن و قابل مصرف است. تغییرات فصلی قابل مشاهده است ولی در دامنه ی بسیار کم، که نشان دهنده ی نبود منبع آلاینده پایدار در شبکه می باشد.



شکل ۱۱- نتایج آزمایشات غلظت سرب آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۱۱- کادمیم:

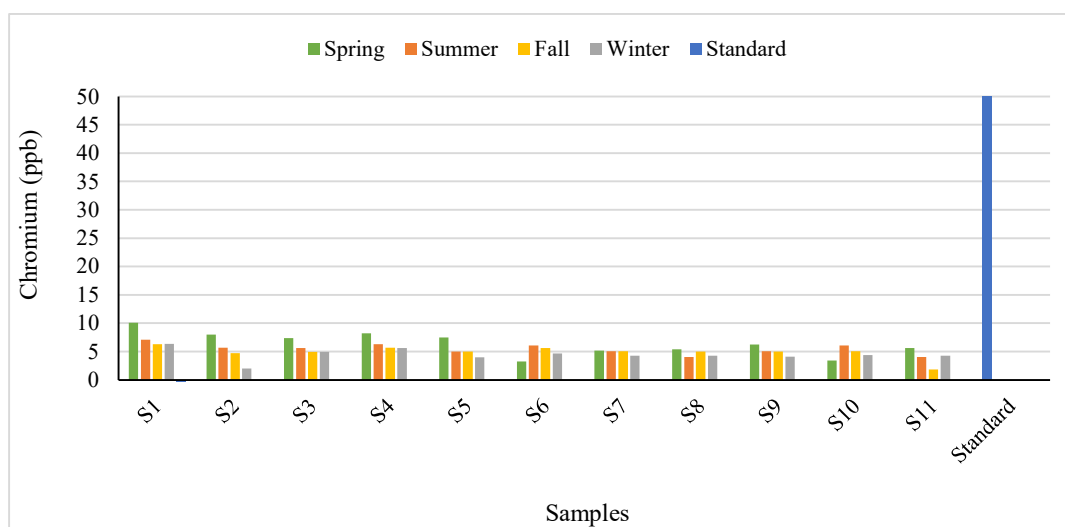
نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت کادمیم در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۱۲ ارائه گردیده است. حداقل مقدار این پارامتر ۰/۴۴ و حداکثر آن ۱/۲۷ ppm در شبکه آب شرب شهر سنندج تعیین مقدار گردیده است. البته در آب خام ورودی تصفیه خانه ها این مقادیر بیشتر و تا ۲/۰۷ ppm هم تعیین گردیده است. مطابق استاندارد ملی ایران (۱۰۵۳) حداکثر مقدار مجاز این فلز در آب آشامیدنی ۳ ppm است. همانطور که مشهود است. مقادیر همه نمونه ها کمتر از حد استاندارد هستند، به عبارتی از نظر شاخص کادمیوم، آب در تمامی نقاط و فصول در محدوده مجاز قرار دارد.



شکل ۱۲- نتایج آزمایشات غلظت کادمیم آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۱۲- کروم:

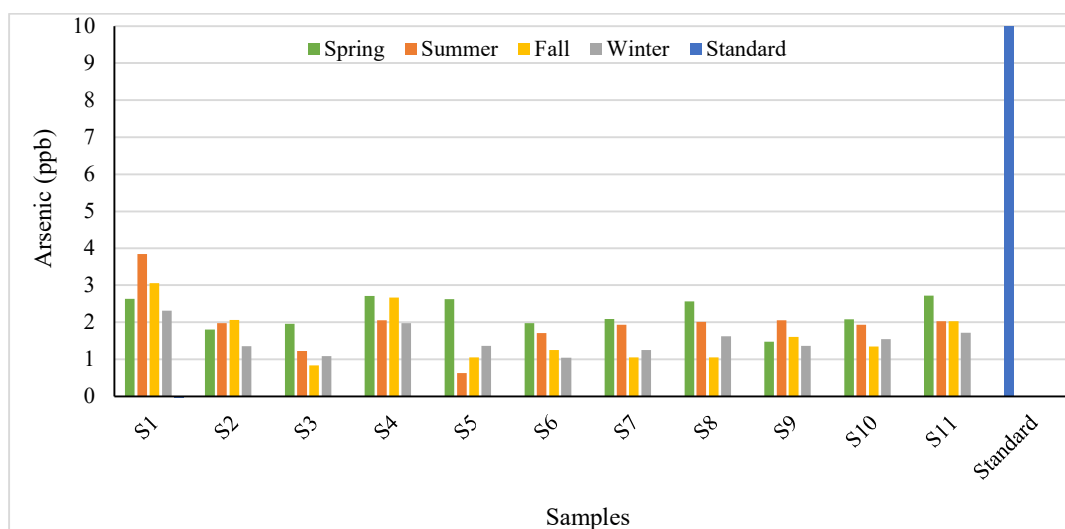
نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت کروم در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۱۳ ارائه گردیده است. همانطوریکه مشهود است، حداقل مقدار این پارامتر $1/84$ و حداکثر آن $7/35$ ppb در شبکه آب شرب شهر سنندج تعیین مقدار گردیده است. البته در آب خام ورودی تصفیه خانه ها این مقادیر بیشتر است. مطابق استاندارد ملی ایران (۱۰۵۳) حداکثر مقدار مجاز این فلز در آب آشامیدنی ۵۰ ppb است. بر این اساس هیچ یک از نمونه های آب شبکه توزیع از حد استاندارد تجاوز نکرده اند. بنابراین آب تمام مناطق از نظر کروم در محدوده ایمن و قابل قبول قرار دارد. همچنین تغییرات فصلی طبیعی است و نشانه ای از آلودگی منظم یا مزمن دیده نمی شود. وجود مقدار اندک در ورودی تصفیه خانه ها طبیعی است و می تواند ناشی از منابع ساختار زمین شناسی یا خوردگی در خطوط انتقال باشد.



شکل ۱۳- نتایج آزمایشات غلظت کروم آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۱۳- آرسنیک:

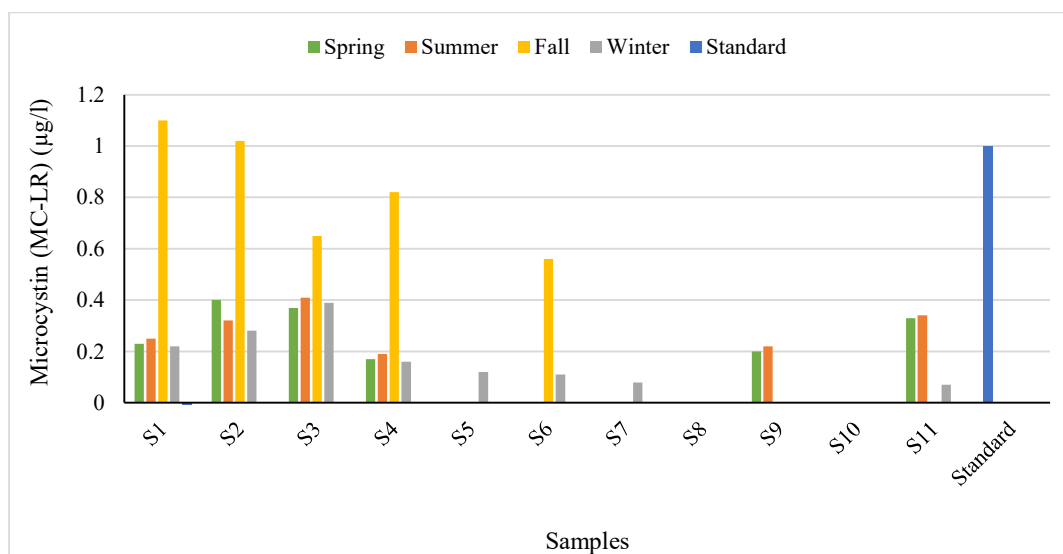
نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت آرسنیک در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۱۴ ارائه گردیده است. بر این اساس حداقل مقدار این پارامتر ۰/۸۴ و حداکثر آن ۲/۷۲ ppb در شبکه آب شرب شهر سنندج تعیین مقدار گردیده است. البته در آب خام ورودی تصفیه خانه ها این مقادیر بیشتر است. مطابق استاندارد ملی ایران (۱۰۵۳) حداکثر مقدار مجاز این فلز در آب آشامیدنی ۱۰ ppb است. همانطوریکه از نتایج مشهود است غلظت آرسنیک در همه ۱۱ ایستگاه در فصول مختلف بسیار کمتر از حداکثر مجاز آرسنیک در آب شرب است. شایان ذکر است بر اساس مطالعات و گزارشات شرکت آب و فاضلاب استان کردستان غلظت این آلاینده در بیش از ۱۰۰ نقطه استان بواسطه ساختارهای زمین شناسی، بالاتر از حد مجاز است ولیکن گزارشی مبنی بر غلظت بالای این پارامتر در رودخانه های استان گزارش نگردیده است.



شکل ۱۴- نتایج آزمایشات غلظت آرسنیک آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۱۴- میکروسیستین LR :

نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت میکروسیستین LR در آب شرب شهر سنندج در شکل شماره ۱۵ ارائه گردیده است. این نمودار تغییرات غلظت میکروسیستین آل ار را در ۱۱ نقطه از سامانه‌ی آب آشامیدنی شهر سنندج (از ورودی تصفیه‌خانه‌ها تا نقاط مختلف شبکه توزیع) در چهار فصل مختلف سال نشان می‌دهد. همچنین ستون آبی با عنوان استاندارد، مقدار حداکثر مجاز ملی (۱۰۵۳) و سازمان جهانی بهداشت ($1 \mu\text{g/L}$) را مشخص نموده است. همانطوریکه مشهود است کمترین غلظت این متابولیت جلبکی در اغلب نقاط شبکه غیر قابل تشخیص و در حد صفر و بیشترین مقدار این پارامتر در شبکه توزیع آب 0.65 ppb تعیین گردیده است. بر این اساس در هیچ یک از نقاط شبکه در فصول مختلف، غلظت میکروسیستین LR از حد مجاز $1 \mu\text{g/L}$ بیشتر نشده است، اما در برخی نقاط و فصول، به‌ویژه پاییز، غلظت نزدیک به این حد بوده خصوصاً در نمونه‌های ایستگاه S3 که مربوط به شبکه توزیع آب روستای قلیان می باشد. البته بیشترین غلظت‌ها تا $1/1$ و $1/0.2 \mu\text{g/L}$ به ترتیب در ورودی و خروجی تصفیه قلیان در فصل پاییز مشاهده شد. بعلاوه بیشترین خطر در فصل پائیز بوده که میتواند به دلیل تغییر در لایه بندی حرارتی آب سد باشد. نتیجه قابل توجه دیگر اینکه تصفیه‌خانه سنندج مؤثر در حذف سم عمل نموده و کیفیت آب آشامیدنی خروجی آن ایمن تر از تصفیه خانه قلیان است که در درجه اول به نوع منبع آب خام و در درجه دوم فرآیندهای مؤثر در حذف جلبک و متابولیت های آن از جمله استفاده از ریز پالاینده (میکرواسترینر) در تصفیه خانه سنندج مرتبط است. دلیل اصلی بالا بودن غلظت این سم در فصول مختلف در آب ورودی تصفیه خانه قلیان نسبت به ورودی تصفیه خانه سنندج، منبع تامین آب می باشد بنحویکه تصفیه خانه قلیان در کل سال از سد قشلاق آب دریافت می کند که قبلاً اشاره شد دچار تغذیه گرایشی شده است، ولیکن منبع تامین آب ورودی تصفیه خانه سنندج از ۲ سال پیش تاکنون سد آزاد بوده که کیفیت مطلوبی دارد ولی با توجه به هزینه های بالا پمپاژ آب خام تا تصفیه خانه، تعمیرات و ... بعضاً از آب سد قشلاق هم به صورت کامل و یا ترکیبی به عنوان منبع دوم یا جایگزین استفاده می گردد. در مجموع کیفیت آب شرب شبکه شهر سنندج و نیز روستای قلیان که در طول یک سال در این مطالعه مورد بررسی و پایش قرار گرفت به لحاظ غلظت این سم جلبکی کمتر از حد مجاز استاندارد بوده است.

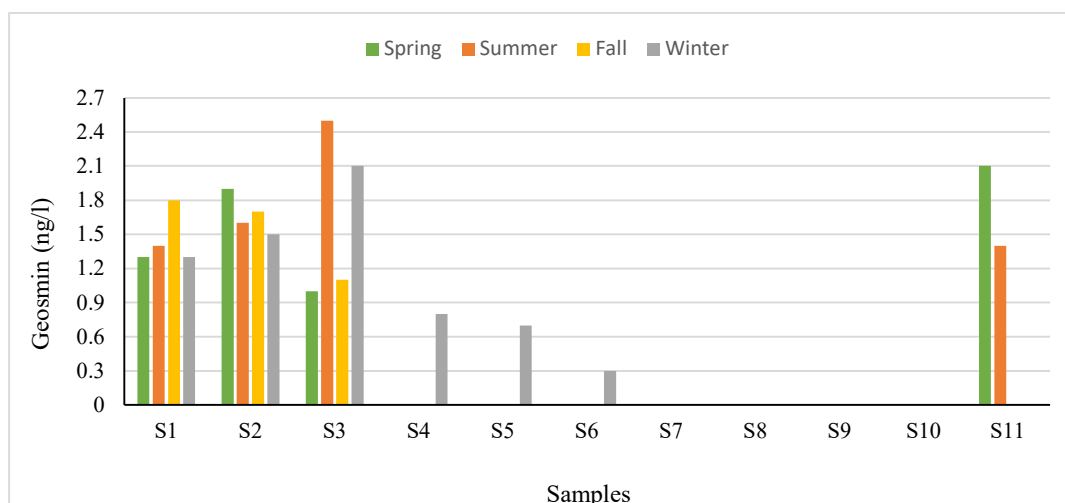


شکل ۱۵- نتایج آزمایشات غلظت میکروسیستین LR آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

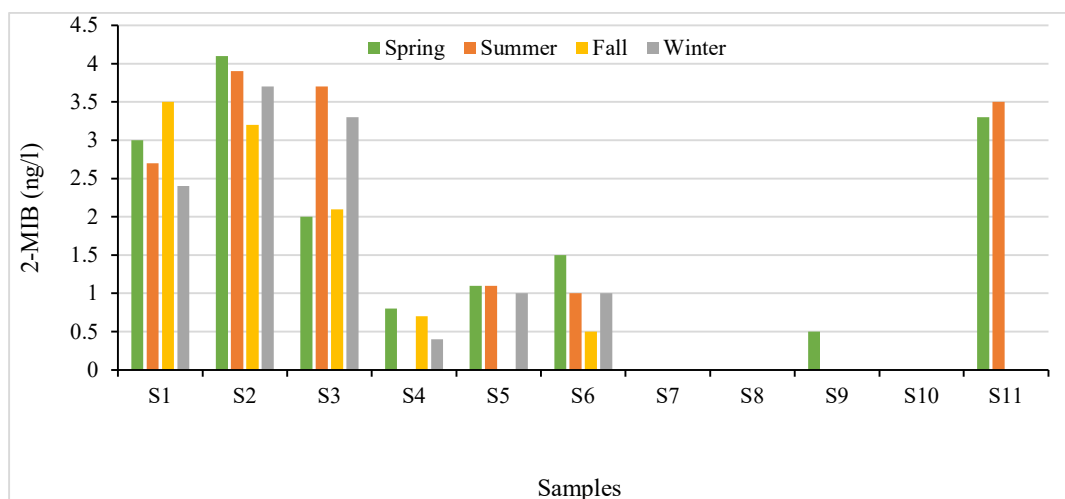
۳-۱۵- ژئوزمین و MIB-2 :

نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت ژئوزمین و MIB بعنوان متابولیت های جلبکی ایجاد کننده طعم و بو در آب شرب شهر سنندج در شکل شماره ۱۶ و ۱۷ ارائه گردیده است. این نمودار ها تغییرات غلظت ژئوزمین و MIB را در ۱۱ نقطه از سامانه ی آب آشامیدنی شهر سنندج (از ورودی تصفیه خانه ها تا نقاط مختلف شبکه توزیع) در چهار فصل مختلف سال نشان می دهند. همانطوریکه مشهود است کمترین غلظت این متابولیت های جلبکی در اغلب نقاط شبکه غیر قابل تشخیص و در حد صفر و بیشترین مقدار جهت ژئوزمین و MIB به ترتیب در شبکه توزیع آب ۲/۵ و ۳/۷ ng/l در شبکه روستای قلیان تعیین گردیده است. هیچ استاندارد الزام آور برای ژئوسمین یا MIB در ایران یا WHO برای آب شرب تعیین نگردیده است. در استاندارد ملی ایران ذکری از این دو ترکیب نشده ولیکن WHO بیان می دارد مشکلات طعم و بوی آب غالباً ناشی از ترکیبات دارای بوی خاکی یا کپکی مانند ژئوسمین و ۲-متیل ایزوبورنئول هستند که معمولاً در غلظت حدود ۴ تا ۱۰ نانوگرم در لیتر توسط مصرف کنندگان قابل احساس اند. بنابراین حدود ۱۰ ng/L و یا $0.1 \mu\text{g/L}$ به عنوان آستانه ی طعم یا رهنمود کیفی این دو متابولیت جلبکی در نظر گرفته شده است [۱]. همانطوریکه در نمودارهای اشکال ۱۶ و ۱۷ مشهود است آب خام ورودی به تصفیه خانه قلیان که منبع آن سد قشلاق (دارای تغذیه گرایی) است دارای این متابولیت ها بوده و فرایندهای متداول این تصفیه خانه از جمله انعقاد و لخته سازی و ته نشینی، تاثیر چندانی در حذف آنها نداشته و حتی غلظت آنها در خروجی تصفیه خانه و شبکه قلیان افزایش یافته که میتواند به دلیل پیش کلر زنی و زمان تماس کلر و در نتیجه لیز شده سلولهای جلبکی و آزاد شده بیشتر این متابولیت ها در آب باشد. در آب ورودی به تصفیه خانه سنندج که اغلب از سد آزاد (با وضعیت کیفی مناسب تر) استفاده میشود معمولاً غلظت این ترکیبات بویژه ژئوزمین در اغلب فصول ناچیز و غیر قابل تشخیص بوده ولیکن در مواقعی که از سد قشلاق به صورت ترکیبی استفاده شده مقادیر این پارامترها تا حدودی مشهود است. در ایستگاه S11 که در انتهای شبکه سنندج قرار دارد مقادیر این دو ترکیب تا حدودی بالا بوده که نیاز به بررسی و پایش بیشتر

دارد. در نهایت میتوان گفت آب شرب شهر سنندج در مدت یکسال پایش مشکل طعم و بوی ناشی از این دو ترکیب شیمیایی را نداشته ولی در شبکه روستای قلیان تا حدودی مقادیر این پارامترها بالا بوده و با شکایات مصرف کنندگان از کیفیت آب در این روستا همخوانی دارد. برخی گونه‌های سیانوباکتری (جلبک‌های سبز-آبی) ترکیبات مانند ژئوسمین و متیل‌ایزوبورنئول تولید می‌کنند که بر طعم و بوی آب تأثیر می‌گذارند و نشان‌دهنده‌ی حضور سیانوباکترها در آب خام هستند. از آنجا که این ویژگی تنها در برخی سویه‌ها از بعضی گونه‌های سیانوباکتری دیده می‌شود، نبود طعم و بوی خاص (مانند بوی خاکی یا کپکی) الزاماً به این معنا نیست که سموم سیانوباکتری (cyanotoxins) در آب وجود ندارند[۲].



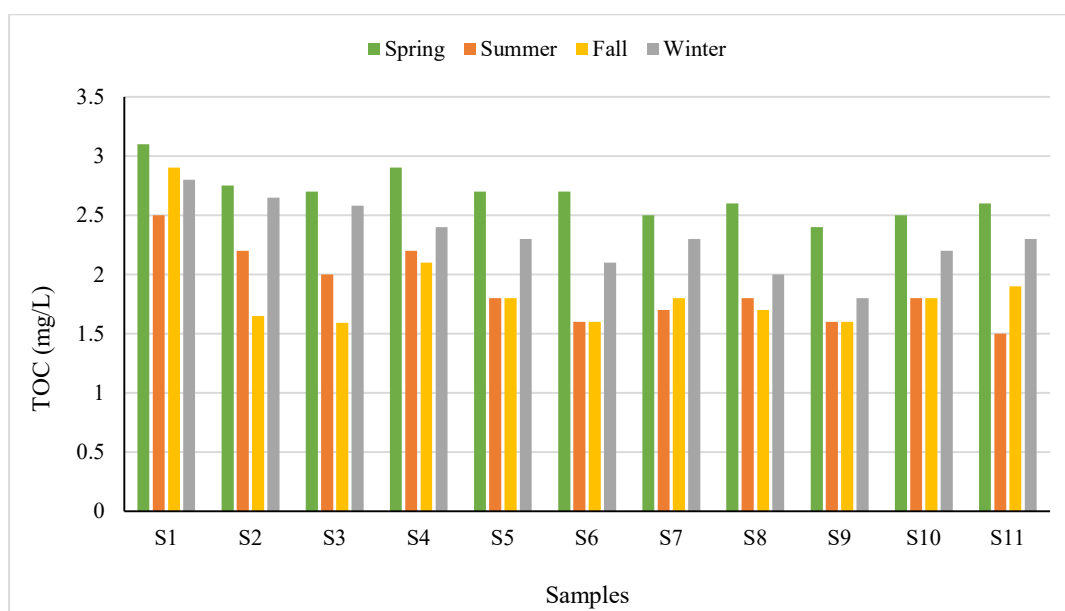
شکل ۱۶- نتایج آزمایشات غلظت متابولیت جلبکی ژئوسمین آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف



شکل ۱۷- نتایج آزمایشات غلظت متابولیت جلبکی 2-MIB آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۱۶- کل کربن آلی (TOC):

نتایج حاصل از اندازه گیری پارامتر کل کربن آلی (TOC) در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۱۸ ارائه گردیده است. بر این اساس حداقل مقدار این پارامتر ۱/۵ و حداکثر آن ۲ میلی گرم بر لیتر در شبکه آب شرب شهر سنندج تعیین مقدار شده که البته در آب خام ورودی تصفیه خانه ها این مقادیر بیشتر است. مطابق استانداردهای EPA حد مجاز TOC برای آب خام ورودی به تصفیه خانه ممکن است تا ۴ mg/L قابل قبول باشد همچنین برای آب خروجی تصفیه خانه پس از حذف مواد آلی معمولاً باید غلظت این پارامتر کمتر از ۲ mg/L باشد. مقدار بالاتر از ۲ mg/L در آب تصفیه شده می تواند به تشکیل محصولات جانبی گندزدا (DBPs) مانند تری هالومتان ها منجر شود. رهنمود پیشنهادی WHO برای TOC در آب شرب ≥ 2 mg/L تعیین گردیده است [۱]. مقادیر بالاتر از این مقدار نشان دهنده وجود مواد آلی تجزیه پذیر، جلبکی یا آلودگی از منابع سطحی است. همانطوریکه از نمودار مشهود است غلظت TOC در اکثر نقاط شبکه آب شرب شهر سنندج کمتر از ۲ میلی گرم بر لیتر بوده ولیکن در برخی نقاط بویژه در فصل بهار اندکی بالاتر از این رهنمود بوده است. در این فصل، ذوب برف و رواناب های سطحی موجب ورود مواد آلی (هومیک، فولیک، برگ و ذرات آلی) به منابع آب می شود که بیانگر نیاز به کنترل بهتر پیش تصفیه در این فصل می باشد.

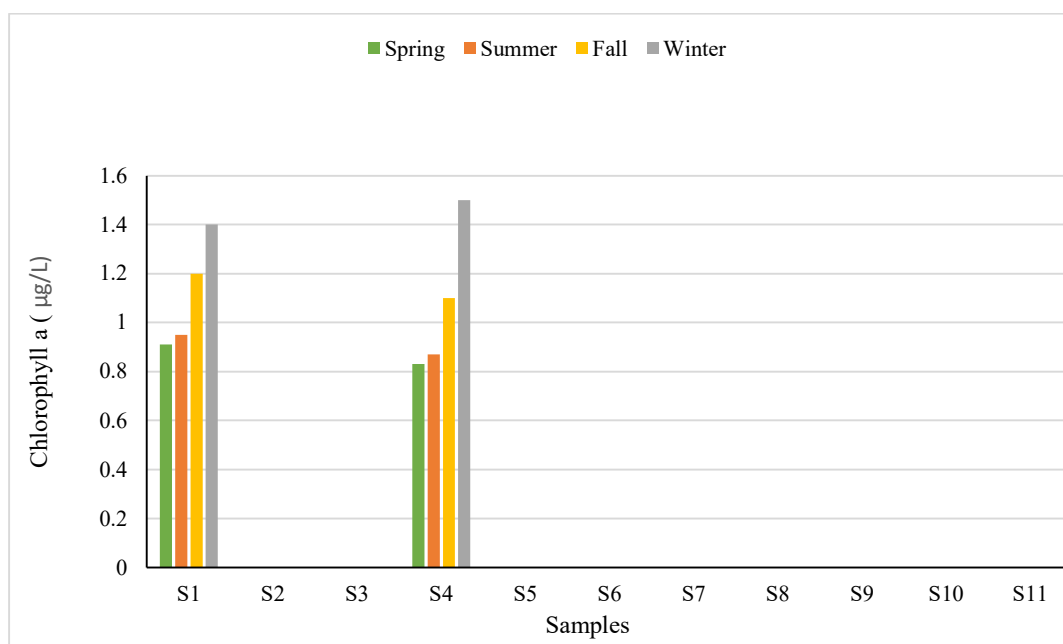


شکل ۱۸- نتایج آزمایشات غلظت TOC آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۱۷- کلروفیل آ:

نتایج حاصل از اندازه گیری پارامتر کلروفیل آ در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۱۹ ارائه گردیده است. بر این اساس حداقل مقدار این پارامتر، غیر قابل تشخیص و در حد صفر در کل شبکه آب قلیان و سنندج

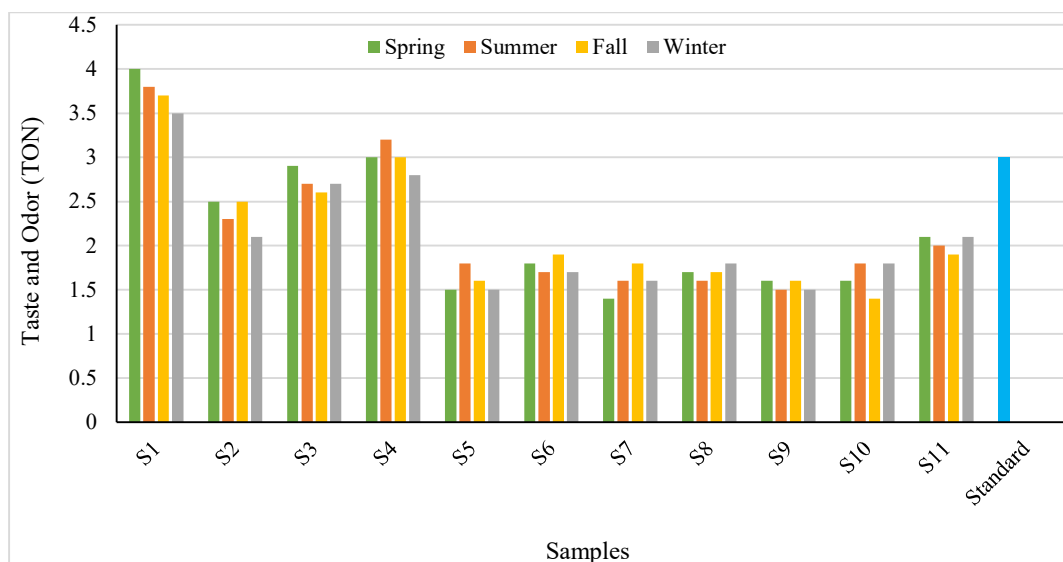
و حداکثر آن حدود ۱/۵ میکرو گرم بر لیتر در ورودی تصفیه خانه ها تعیین مقدار گردیده است. در استانداردهای ملی و بین‌المللی آب آشامیدنی (مانند استاندارد ملی ایران شماره ۱۰۵۳ و راهنمای WHO) محدوده مجاز خاصی برای کلروفیل a در آب آشامیدنی تعریف نشده است. اما به‌عنوان شاخص کیفی آب منبع (Source Water)، مقادیر کمتر از ۵ میکروگرم در لیتر معمولاً قابل قبول و نشان‌دهنده شرایط عادی است. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد آب تصفیه شده سنندج و قلیان از نظر شاخص کلروفیل a، عاری از آلودگی جلبکی است و کیفیت آن با شاخص های کیفی آب آشامیدنی مطابقت دارد. در منابع آب سطحی، اگر کلروفیل a از حدود ۱۰ $\mu\text{g/L}$ فراتر رود، نشان‌دهنده احتمال شکوفایی جلبکی (Algal Bloom) است که ممکن است باعث مشکلات طعم، بو یا حتی تولید سموم جلبکی گردد [۱].



شکل ۱۹- نتایج آزمایشات کلروفیل آ آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۱۸- طعم و بو:

نتایج حاصل از اندازه گیری پارامتر طعم و بو در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در شکل شماره ۲۰ ارائه گردیده است. همانطور که مشخص است، حداقل مقدار این پارامتر ۱/۴ و حداکثر آن ۲/۹ واحد بو (TON) در شبکه آب شرب روستای قلیان تعیین مقدار گردیده است. البته در آب خام ورودی تصفیه خانه ها این مقادیر بیشتر و تا ۴ واحد بو (TON) هم تعیین گردیده است. مطابق استاندارد ملی ایران (۱۰۵۳) حداکثر مقدار مجاز این پارامتر کیفی جهت گوارایی و مقبولیت عمومی در آب آشامیدنی ۳ TON است. بر این اساس مقادیر همه نمونه‌های شبکه کمتر از حد استاندارد هستند، با وجود اینکه مقادیر طعم و بو در آب خام وردی به تصفیه خانه ها بویژه تصفیه خانه قلیان بیشتر از استاندارد است که با عملکرد مناسب تصفیه خانه ها در این زمینه مقادیر این پارامتر کاهش یافته است.



شکل ۲۰- نتایج آزمایشات طعم و بوی آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

۳-۱۹- ارزیابی ریسک بهداشتی:

نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت میکرو سیستمین ال ار به عنوان شاخص سموم جلبکی در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در جدول شماره ۱۰ ارائه گردیده که توضیحات آن در بخش ۳-۱۴ ارائه گردید. همانطوریکه در بخش مواد و روشها گفته شد در این مطالعه جهت ارزیابی خطر بهداشتی سم میکرو سیستمین ال آر بر روی بزرگسالان و کودکان، از مدل ارزیابی خطر سلامتی سازمان محیط زیست ایالت متحده (USEPA) با استفاده از روابط ارائه شده در بخش روشها با محاسبه دوز متوسط روزانه مزمن (CDI)، شاخص خطر غیر سرطان زایی (HQ) و شاخص خطر سرطان زایی (ELCR) دریافت گوارشی سم میکرو سیستمین ال ار انجام گردیده است. نکته قابل توجه اینکه در محاسبه CDI علاوه بر منابع EPA از رهنموده های WHO هم استفاده گردیده که مقادیر در بخش روشها مشخص گردیده است. همچنین در محاسبه شاخص HQ، برابر رهنمود WHO، دز مرجع حداکثر مواجهه یا RfD، که بالاترین دوز روزانه ای است که انسانها در طول عمر خود می توانند بدون هیچ گونه خطر قابل توجهی در معرض آن قرار بگیرند، جهت سم میکروسیستین ال ار $0.04 \mu\text{g/kg bw/day}$ تعیین گردیده است. به علاوه جهت محاسبه شاخص خطر سرطان زایی (ELCR)، این سم، مطابق داده های EPA مقدار ضریب پتانسیل سرطان زایی (SF) برابر $1 \times 10^{-3} (\mu\text{g/kg/day})^{-1}$ تعیین گردیده است (جدول ۱۱). ارزیابی ریسک غیر سرطانزایی و سرطانزایی سم میکروسیستین LR در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف در جداول شماره ۱۲ و ۱۳ ارائه گردیده است. همچنین جمع بندی ارزیابی ریسک و مقایسه نهایی در جدول ۱۴ تشریح گردیده است.

همانطوریکه مطابق جدول ۱۲ مشهود است، در خصوص ارزیابی ریسک غیر سرطانزایی میکروسیستین LR، تمام مقادیر $HQ > 1$ برای بزرگسالان و کودکان بوده و نشاندهنده عدم بروز اثرات غیر سرطانزا است و به عبارتی خطر غیر سرطانزایی این سم قابل چشم پوشی می باشد. بیشترین HQ در خروجی تصفیه خانه قلیان (۰/۴۲) برای بزرگسالان و ۰/۸۵ برای

کودکان) مشاهده می‌شود که همچنان پایین‌تر از ۱ است اما به آستانه نزدیک می‌شود. بنابراین کیفیت آب در این ناحیه باید پایش مداوم داشته و کنترل فرایندهای تصفیه خانه توصیه می‌شود. دلیل بالا بودن مقادیر HQ در خروجی تصفیه خانه قلیان نسبت به ورودی آن می‌تواند استفاده از پیش‌کلر زنی و در نتیجه لیز شدن سلول‌های جلبکی و آزاد شدن سموم درون سلولی باشد. همچنین در خصوص ارزیابی اثرات سرطانزایی این سم همانطور که در جدول ۱۳ تشریح گردیده است،

همه مقادیر ELCR بین 10^{-6} تا 10^{-5} هستند که در محدوده قابل قبول و مدیریتی ($ELCR \leq 10^{-4}$) قرار دارند. بیشترین مقدار ELCR برای کودکان در ایستگاه ۲ که خروجی تصفیه خانه قلیان می‌باشد، برابر $3/4 \times 10^{-5}$ است که نزدیک سقف محدوده قابل قبول و در نتیجه نیازمند کنترل و پایش بیشتر بویژه در فصل تابستان می‌باشد. در مجموع میتوان گفت در حال حاضر، خطر سلامت ناشی از میکروسپستین LR در آب آشامیدنی شهر سنندج برای هر دو گروه سنی در محدوده ایمن قرار دارد. با این حال، با توجه به افزایش غلظت‌ها در پاییز در خروجی تصفیه‌خانه قلیان و شبکه آب این روستا، پایش فصلی و بهبود فرآیندهای تصفیه توصیه می‌شود.

جدول ۱۰- نتایج و میانگین غلظت میکروسیستین LR بر حسب میکرو گرم بر لیتر آب شهر سنندج در چهار فصل

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	Standard (µg/L) (IRIS)
Spring	0.23	0.4	0.37	0.17	0	0	0	0	0.2	0	0.33	1
Summer	0.25	0.32	0.41	0.19	0	0	0	0	0.22	0	0.34	1
Fall	1.1	1.02	0.65	0.82	0	0.56	0	0	0	0	0	1
Wwinter	0.22	0.28	0.39	0.16	0.12	0.11	0.08	0	0	0	0.07	1
Mean	0.45	0.505	0.455	0.335	0.03	0.167	0.02	0	0.105	0	0.185	1

جدول ۱۱- داده‌های مورد نیاز جهت محاسبات ارزیابی ریسک غیر سرطانزایی و سرطانزایی

ردیف	پارامتر	نماد	واحد	برای بزرگسالان	برای کودکان	توضیحات / منبع
1	غلظت میکروسیستین- LR در آب	C_i	µg/L	داده‌های آزمایش	داده‌های آزمایش	میانگین سالیانه نتایج
2	نرخ مصرف آب آشامیدنی	IR (Ingestion Rate)	L/day	2	1	WHO
3	دوره مواجهه	ED (Exposure Duration)	year	70	10	USEPA
4	فراوانی مواجهه	EF (Exposure Frequency)	day/year	365	365	USEPA
5	وزن بدن	BW (Body Weight) –	kg	60	15	WHO
6	طول مدت متوسط عمر	AT (Averaging Time)	day	25,550	3,650	USEPA
7	ضریب دسترسی زیستی	RBA (Relative Bioavailability)	بدون بعد	۱	۱	فرض معمول، جذب کامل
8	دوز مرجع بدون خطر	RfD (Reference Dose)	µg/kg/day	0.04	0.04	WHO
9	فاکتور شیب سرطان‌زایی	SF (Slope Factor)	(µg/kg/day) ⁻¹	1×10^{-3}	1×10^{-3}	USEPA

جدول ۱۲- ارزیابی ریسک غیر سرطانزایی سم میکروسیستین LR در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

شماره نمونه	محل نمونه برداری	C _i (µg/L)	CDI بزرگسال (µg/kg.day)	HQ بزرگسال	CDI کودک (µg/kg.day)	HQ کودک	تحلیل
S1	ورودی تصفیه خانه قلیان	0.45	0.0150	0.38	0.030	0.75	در محدوده ایمن، نزدیک به آستانه HQ=1 برای کودکان، البته در آب خام تصفیه نشده
S2	خروجی تصفیه خانه قلیان	0.505	0.0168	0.42	0.034	0.85	در محدوده ایمن، نزدیک به آستانه HQ=1 برای کودکان، بالاترین HQ، کنترل فرایند تصفیه توصیه می شود
S3	شبکه توزیع قلیان	0.455	0.0152	0.38	0.030	0.76	قابل قبول، اما نشانه وجود منابع میکروسیستین در شبکه
S4	ورودی تصفیه خانه سنندج	0.335	0.0112	0.28	0.022	0.56	HQ پایین، نشان دهنده کیفیت مناسبتر آب خام ورودی
S5	خروجی تصفیه خانه سنندج	0.03	0.0010	0.025	0.002	0.056	بدون خطر، نمونه مرجع پاک، نشان دهنده کارایی مناسب واحدهای تصفیه
S 6	شهرک بعثت	0.167	0.0056	0.14	0.011	0.28	ایمن اما قابل رصد در فصل گرم
S7	میدان انقلاب	0.02	0.0007	0.017	0.001	0.033	ایمن کامل
S8	شهرک وحدت	0	0	0	0	0	بدون ریسک
S9	دوشان	0.105	0.0035	0.087	0.007	0.175	بسیار پایین و بی اثر
S10	نایسر	0	0	0	0	0	بدون ریسک
S11	شهرک بهاران	0.185	0.0062	0.155	0.012	0.31	در محدوده مجاز، قابل توجه در پاییز

جدول ۱۳- ارزیابی ریسک سرطانزایی سم میکروسیستین LR در آب شرب شهر سنندج در چهار فصل مختلف

شماره نمونه	محل نمونه برداری	CDI بزرگسال	ELCR بزرگسال	CDI کودک	ELCR کودک	تحلیل و تفسیر
S1	ورودی تصفیه خانه قلیان	0.0150	1.5×10^{-5}	0.030	3.0×10^{-5}	در محدوده قابل قبول (10^{-6} – 10^{-4})
S2	خروجی تصفیه خانه قلیان	0.0168	1.7×10^{-5}	0.034	3.4×10^{-5}	نزدیک سقف محدوده قابل قبول ، نیازمند کنترل و پایش بیشتر
S3	شبکه قلیان	0.0152	1.5×10^{-5}	0.030	3.0×10^{-5}	در محدوده ایمن، اما پایش فصلی ضروری است
S4	ورودی تصفیه خانه سنندج	0.0112	1.1×10^{-5}	0.022	2.2×10^{-5}	خطر کم، نشان دهنده کیفیت مناسب آب خام ورودی به تصفیه خانه
S5	خروجی تصفیه خانه سنندج	0.0010	1.0×10^{-6}	0.002	2.0×10^{-6}	بدون خطر سلامت
S 6	شهرک بعثت	0.0056	5.6×10^{-6}	0.011	1.1×10^{-5}	ایمن و تحت کنترل
S7	میدان انقلاب	0.0007	6.7×10^{-7}	0.001	1.3×10^{-6}	کمتر از حد قابل توجه
S8	شهرک وحدت	0	0	0	0	بدون خطر
S9	دوشان	0.0035	3.5×10^{-6}	0.007	7.0×10^{-6}	ایمن کامل
S10	نایسر	0	0	0	0	بدون ریسک
S11	شهرک بهاران	0.0062	6.2×10^{-6}	0.012	1.2×10^{-5}	در محدوده ایمن، قابل اطمینان

جدول ۱۴- جمع بندی و مقایسه نهایی ارزیابی ریسک سرطانزایی سم میکروسیستین LR در آب شرب شهر سنندج

وضعیت کلی	حدود ایمن مرجع	کودکان	بزرگسالان	شاخص
ایمن	$HQ < 1$	0.34	0.17	HQ میانگین
نزدیک به آستانه، نیاز به پایش مداوم	$HQ < 1$	(نقطه 2) 0.85	(نقطه 2) 0.42	HQ بیشینه
در محدوده قابل قبول	$10^{-6} \leq ELCR \leq 10^{-4}$	1.6×10^{-5}	8.3×10^{-6}	ELCR میانگین
قابل قبول اما در مرز احتیاط	$< 10^{-4}$	3.4×10^{-5}	1.7×10^{-5}	ELCR بیشینه

۴- نتیجه گیری و پیامدهای اصلی مطالعه

۴-۱- نتایج:

نتایج حاصل از آنالیز پارامترهای متداول کیفیت آب شامل pH، کلر باقی مانده، کدورت، شاخص جذب فرابنفش در ۲۵۴ نانومتر (UV254)، نیتрат، کربن آلی کل (TOC)، کلروفیل a، طعم و بو در شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج و روستای قلیان در فصول مختلف سال ۱۴۰۳ نشان داد که تمامی پارامترها در بازه استاندارد ملی ایران (استاندارد ۱۰۵۳ آب آشامیدنی) قرار دارند. این موضوع بیانگر کنترل مناسب شرایط عملیاتی تصفیه خانه ها و کارایی قابل قبول فرآیندهای تصفیه است. با این حال، مقادیر پایین کلر باقیمانده و اندکی نوسان در کدورت و شاخص طعم و بو مشاهده شد که حاکی از حساسیت این پارامترها به تغییرات دمایی و کیفیت آب خام ورودی در فصول مختلف است، بنابراین نیاز به پایش دقیق تر و مستمر در بازه های زمانی کوتاه تر در این خصوص لازم و ضروری می باشد.

نتایج سنجش فلزات سنگین شاخص شامل مس، روی، منگنز، سرب، کادمیم، کروم و آرسنیک نشان داد که تمامی مقادیر اندازه گیری شده کمتر از حدود مجاز ملی و بین المللی هستند و در محدوده ایمن برای آب شرب قرار دارند. تنها پارامتر آهن (Fe) در برخی ایستگاه ها به ویژه در فصل پاییز از حد مجاز فراتر بوده که این رخداد احتمالاً ناشی از نوع منعقدکننده های شیمیایی مورد استفاده (کلروفریک) در فرآیند تصفیه و یا با احتمال کمتر ناشی از اثرات خوردگی لوله های شبکه آبرسانی بوده است.

در بخش تحلیل متابولیت های جلبکی، داده های حاصل از کروماتوگرافی نشان داد که غلظت میکروسیستین-LR در اغلب ایستگاه ها شبکه آب شهر سنندج غیر قابل تشخیص یا در حد صفر بوده و بیشترین مقدار ثبت شده در شبکه توزیع آب روستای قلیان برابر $0.65 \mu\text{g/L}$ بوده است. این مقدار از حد مجاز ملی و WHO ($1 \mu\text{g/L}$) پایین تر بوده که از دیدگاه ایمنی مصرف کننده بدون خطر ارزیابی می شود. به همین ترتیب، ترکیبات ژئوزمین و ۲-متیل ایزبورنئول (2-MIB) نیز در اکثر نقاط شبکه سنندج قابل تشخیص نبوده و حداکثر مقادیر آنها در روستای قلیان به ترتیب برابر با $2/5$ و $3/7 \text{ ng/l}$ اندازه گیری شد. این میزان برای ایجاد تأثیر محسوس بر طعم و بوی آب نسبتاً ناکافی است.

نتایج ارزیابی ریسک غیرسرطان‌زایی براساس شاخص HQ (Hazard Quotient) نشان داد مقدار HQ در کلیه نمونه‌ها برای هر دو گروه سنی بزرگسالان و کودکان کمتر از ۱ ($HQ < 1$) بوده است، که بیانگر عدم بروز خطرات مزمن غیرسرطان‌زا در اثر مواجهه با میکروسیستین LR در آب شرب است. همچنین محاسبات ریسک سرطان‌زایی (ELCR) مقادیری در بازه‌ی 10^{-6} تا 10^{-5} را نشان داد که در حدود قابل قبول و مدیریتی ($ELCR \leq 10^{-4} \geq 10^{-6}$) قرار دارند. بر مبنای این نتایج، اثرات سرطان‌زایی بلندمدت ناشی از قرارگیری مزمن در معرض این سم نیز در حد قابل چشم‌پوشی ارزیابی می‌گردد. در مجموع اتخاذ راهبردهای مدیریتی پیشگیرانه از جمله بازبینی و اجرای صحیح برنامه ایمنی آب آشامیدنی و بهبود فرآیندهای تصفیه و در نهایت پایش مداوم، می‌تواند ایمنی و کیفیت آب شرب را تضمین نماید.

۲-۴- پیامدهای علمی حاصل از مطالعه

۱- **کیفیت آب خام:** نتایج آنالیز آب خام نشان داد آب خام ورودی به تصفیه‌خانه سندنجد (که عمدتاً از سد آزاد شده) از کیفیت مناسبتری نسبت به آب خام ورودی به تصفیه‌خانه روستای قلیان (که صرفاً از سد قشلاق تامین می‌گردد) برخوردار است. همچنین در این مطالعه تأیید میشود کیفیت آب سد قشلاق بویژه به لحاظ کل مواد آلی (TOC)، طعم و بو و متابولیت‌های جلبکی بویژه میکروسیستین LR در وضعیت مطلوبی قرار ندارد که این موضوع ضرورت اجرای برنامه جامع جهت علاج بخشی این سد را بیان می‌دارد.

۲- **پایداری کیفی آب شرب:** نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سامانه‌ی تصفیه و توزیع آب شرب شهر سندنجد از کارایی مناسبی در حذف آلاینده‌های آلی و معدنی برخوردار است که البته بخش قابل توجه این موفقیت به کیفیت مناسب آب خام ورودی از سد آزاد مرتبط است. در نتیجه ضرورت دارد با اجرای دقیق و به موقع برنامه ایمنی آب آشامیدنی کیفیت آب این سد حفظ گردد.

۳- **تأثیر تغییرات فصلی:** نوسانات محدود در مقادیر کدورت، کلر باقی‌مانده و طعم و بو احتمال تأثیرپذیری سامانه از شرایط اقلیمی و افزایش بار مواد آلی در ورودی تصفیه‌خانه را نشان می‌دهد، بنابراین توجه به تغییرات فصلی در بهره‌برداری ضروری است.

۴- **اهمیت کنترل فرآیندهای شیمیایی تصفیه‌خانه:** افزایش موقتی آهن در فصل پاییز به عنوان نشانه ضعف احتمالی در انتخاب نوع منعقدکننده یا فرسایش تجهیزات تصفیه‌خانه و شبکه باید در بهره‌برداری و طراحی‌های آینده مورد توجه قرار گیرد.

۵- **ریسک بهداشتی پایین اما پایداری:** هرچند ریسک بهداشتی میکروسیستین LR در حال حاضر در حد ایمن است، اما استمرار تغییرات اقلیمی و احتمال شکوفایی جلبکی در منابع سطحی مخازن سد آزاد و قشلاق می‌تواند تهدید بلندمدتی برای کیفیت آب محسوب شود. بنابراین نیاز به برنامه جامع مدیریتی در خصوص حفاظت کیفی از منابع تامین آب (سد آزاد و قشلاق) ضروری است.

۶- **لزوم مدیریت پیشگیرانه:** نتایج بر لزوم اجرای راهبردهای پیشگیرانه و بهبود مستمر سیستم‌های تصفیه، ذخیره و انتقال آب تأکید دارد تا از بروز بحران‌های کیفی در شرایط تغییر اقلیم جلوگیری گردد.

۵- پیشنهادات کاربردی و مدیریتی

۱. اجرای کامل برنامه ایمنی آب آشامیدنی (Water Safety Plan):

اجرای دقیق و به موقع برنامه ایمنی آب آشامیدنی (WSP) با گستره حوضه آبریز تا مصرف کننده با همکاری کلیه ارگانهای ذیربط استان مطابق سند بالادستی راهبرد ملی بهبود کیفیت آب شرب کشور جهت آب شرب شهر سنندج با در نظر گرفتن منبع تامین آب از هر دو سد آزاد و قشلاق انجام گردد. همچنین در صورت انجام این برنامه، بازنگری های لازم با تاکید بر راهکارهای پیشگیری از تولید متابولیت های جلبکی صورت پذیرد. به علاوه در بازنگری WSP، تجدید نظر در نقاط بحرانی کنترل، دستورالعمل های بهداشتی و سناریوهای بحران برای سازگاری با تغییرات اقلیمی منطقه نیز در نظر گرفته شود.

۲. اقدامات کنترلی در حوضه آبریز، رودخانه منتهی به سد ها و دریاچه های آنها:

- تعیین ایستگاه های ثابت پایش در دریاچه سدها (آزاد و قشلاق) و رودخانه های منتهی به آنها و پایش اصولی و دوره ای پارامترهای کیفی آب مطابق نشریات وزارت نیرو با تاکید بر شاخصهای کلیدی مرتبط با تغذیه گرایی از جمله کلروفیل-a، TOC، UV254، ازت و فسفر، متابولیت های جلبکی و به ویژه شاخص سموم جلبکی به صورت حداقل فصلی انجام گردد.

- اجرای برنامه های جامع مدیریت حوضه آبریز شامل عدم نشت فاضلاب شهری و صنعتی، کنترل بار فسفر و ازت، ایجاد کمربند سبز در اطراف مخازن هر دو سد و نظارت ویژه بر مزارع بالادست با هدف پیشگیری از رواناب های غنی از مواد مغذی که عامل اصلی شکوفایی جلبکی هستند.

- کنترل پوشش گیاهی و حفظ و احیای پوشش گیاهی طبیعی در حاشیه منابع آبی جهت کاهش فرسایش خاک و ورود رسوبات و مواد مغذی.

- امکان سنجی کاهش و حذف جلبکها با روشهای مختلف از جمله حذف فیزیکی، بهم زدن شرایط سکون و رشد آنها از طریق هوادهی نقاط راکد، محدود کردن منبع نور، استفاده از امواج التراسونیک، استفاده از مواد شیمیایی جلبک کش و در نهایت کنترل بیولوژیکی (از جمله استفاده از ماهی کپور نقره ای با در نظر گرفتن ملاحظات وزارت نیرو و دستورالعملهای مربوطه) در دریاچه سد قشلاق.

- آبیگری از لایه ترموکلاین سد (در مواقع لایه بندی حرارتی آب سد) با احداث برج آبیگری در سد قشلاق.

- سیستم های اطلاعات مکانی: (GIS) برای نقشه برداری از پراکندگی شکوفایی های جلبکی در مخازن و پیش بینی حرکت آنها به سمت تأسیسات آبیگری.

۳. اقدامات کنترلی و بهینه سازی فرآیندها در تصفیه خانه آب :

- گنجاندن آنالیز متابولیت های جلبکی و به ویژه سم میکروسیستین LR در آنالیزهای متداول آب ورودی و خروجی تصفیه خانه حداقل به صورت فصلی.
- تصب میکرواستر با سایز مناسب جهت حذف فیزیکی جلبکها.
- پیش اکسیداسیون: استفاده از اکسیدکننده های مناسب از جمله ازن یا پرمنگنات پتاسیم (با دوز کنترل شده) جهت لیز نمودن و شکستن ساختار سلولی جلبکها و تسهیل حذف متابولیت ها.
- انعقاد و لخته سازی: انتخاب منعقدکننده های مناسب و بهینه سازی شرایط انعقاد جهت حداکثر حذف جلبکها و ذرات معلق.
- ته نشینی و فیلتراسیون: اطمینان از کارایی واحدهای ته نشینی و فیلتراسیون (به ویژه فیلترهای ماسه ای و فیلترهای غشایی) در حذف سلول های جلبکی و ذرات کلوئیدی .
- کربن فعال پودری (PAC): افزودن PAC در مراحل مناسب فرآیند تصفیه می تواند به جذب سموم جلبکی و ترکیبات مولد طعم و بو کمک نماید.
- فیلترهای کربن فعال گرانولی (GAC): استفاده از GAC در مراحل نهایی تصفیه جهت جذب پایدارتر سموم و ترکیبات آلی .
- فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs): استفاده از ترکیباتی مانند ازن/پراکسید هیدروژن و UV در ترکیب با پراکسید هیدروژن جهت تخریب کامل سموم جلبکی که در برابر اکسیداسیون معمول مقاوم تر هستند.
- کلرزنی: اگرچه کلر در غلظت های بالا می تواند برخی سموم جلبکی را غیرفعال نماید، اما ممکن است با تخریب ناقص سلول ها، به آزاد شدن سموم درون سلولی کمک نماید. همچنین، کلر ممکن است با متابولیت های جلبکی واکنش داده و محصولات جانبی گندزدایی (DBPs) جدیدی تولید کند. بنابراین، کلرزنی باید به عنوان یک مرحله نهایی و با دوز کنترل شده در نظر گرفته شود.
- گندزدایی با UV: اشعه UV می تواند در غیرفعال سازی سموم جلبکی و از بین بردن سلول های زنده جلبکها مؤثر باشد.
- توانمندسازی نیروی انسانی و اطلاع رسانی عمومی با برگزاری دوره های آموزشی برای کارشناسان آزمایشگاه و بهره برداران تصفیه خانه آب در زمینه پایش سیانوتوکسین ها و استفاده از تجهیزات پیشرفته آنالیز (HPLC, LC-MS/MS).

۴. اقدامات کنترلی و پیشنهادات در شبکه توزیع آب :

- گنجاندن آنالیز متابولیت های جلبکی و به ویژه سم میکروسیستین LR در پایشهای متداول در آب مخازن ذخیره سطح شهر و شبکه توزیع آب شرب شهر سنندج حداقل به صورت فصلی.
- ثبت داده ها در سامانه GIS جهت ردیابی مکانی نقاط پرخطر.

۵. مدیریت بحران و اطلاع رسانی :

- تدوین برنامه واکنش اضطراری (Emergency Response Plan): شامل پروتکل های مشخص برای هر سطح هشدار، مسئولیت ها، و اقدامات لازم (مانند تغییر دوز مواد شیمیایی، تعلیق آگیری از منبع، اطلاع رسانی عمومی).
- ارتباط مؤثر با عموم: اطلاع رسانی شفاف به مردم در صورت بروز هرگونه مشکل کیفی، علل و اقدامات انجام شده. این امر به حفظ اعتماد عمومی و جلوگیری از شایعات کمک می نماید.
- همکاری با نهادهای مسئول: هماهنگی با شرکت آب منطقه ای، شرکت آب و فاضلاب، سازمان های محیط زیست، معاونت بهداشتی دانشگاه علوم پزشکی جهت اجرای مؤثر برنامه های مدیریتی در کل حوضه آبریز.
- اطلاع به مراکز بهداشتی در صورت مشاهده مقدار بالاتر از استاندارد سم میکروسیستین LR.
- طراحی بروشور آموزشی برای عموم با محور نقش جلبک ها در کیفیت آب و روشهای تصفیه خانگی.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از معاونت تحقیقات و فناوری وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی و دانشگاه علوم پزشکی کردستان به دلیل حمایت مالی از اجرای این طرح پژوهشی اعلام می‌داریم. همچنین از همکاری ارزشمند مدیران و کارشناسان محترم شرکت آب و فاضلاب استان کردستان، به ویژه در بخش تصفیه‌خانه و شبکه توزیع آب، در فراهم‌سازی بستر مناسب جهت نمونه‌برداری و انجام مراحل اجرایی مطالعه صمیمانه تشکر می‌نماییم. بی‌تردید، حمایت‌ها و همراهی‌های انجام‌شده نقش مؤثری در پیشبرد این پژوهش داشته و زمینه تحقق اهداف علمی این طرح را فراهم نموده است.

- .١ Organization, W.H., *Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda*. 2022: World Health Organization.
- .٢ Organization, W.H., *Cyanobacterial toxins: microcystins*. 2020, World Health Organization.
- .٣ Lu, Y., et al., *Policy: Five priorities for the UN sustainable development goals*. 2015. 520(7548): p. 432–433.
- .٤ Sivonen, K.J.W., *A Guide to Their Health Consequences, Monitoring and Management, Cyanobacterial toxins. Toxic Cyanobacteria*. 1999.
- .٥ Nowicka, B.J.E.S. and P. Research, *Heavy metal-induced stress in eukaryotic algae—mechanisms of heavy metal toxicity and tolerance with particular emphasis on oxidative stress in exposed cells and the role of antioxidant response*. 2022. 29(12): p. 16860–16911.
- .٦ i Quer, A.M., et al., *Cyanobacterial blooms in surface waters—nature-based solutions, cyanotoxins and their biotransformation products*. 2024. 251: p. 121122.
- .٧ Graham, J.L., et al., *Cyanotoxin mixtures and taste-and-odor compounds in cyanobacterial blooms from the Midwestern United States*. 2010. 44(19): p. 7361–7368.
- .٨ Cheung, M.Y., S. Liang, and J.J.J.o.M. Lee, *Toxin-producing cyanobacteria in freshwater: A review of the problems, impact on drinking water safety, and efforts for protecting public health*. 2013. 51(1): p. ١٠–١٠ .
- .٩ Funari, E. and E.J.C.r.i.t. Testai, *Human health risk assessment related to cyanotoxins exposure*. 2008. 38(2): p. 97–125.
- .١٠ Olivera Araujo, F.d.J.I.P.-S.o.P. and R.-I.A.H. Sciences, *Effects of cyanobacteria on drinking water and human health :an epidemiological study in Évora, Portugal*. 1995. 233: p. 101–110.
- .١١ Annadotter, H., et al., *An extensive outbreak of gastroenteritis associated with the toxic cyanobacterium Planktothrix agardhii (Oscillatoriales, Cyanophyceae) in Scania, South Sweden*. 2001: p. 200–208.
- .١٢ Texeira, M.d.G.L.C., et al., *Gastroenteritis epidemic in the area of the Itaparica Dam, Bahia, Brazil*. 1993.
- .١٣ Grosse, Y., et al., *Carcinogenicity of nitrate, nitrite, and cyanobacterial peptide toxins*. 2006.
- .١٤ Tirkey, P., et al., *Assessment of groundwater quality and associated health risks: a case study of Ranchi city, Jharkhand, India*. *Groundwater for Sustainable Development*., 2017: p. 85–100.
- .١٥ Organization, W.H., *WHO human health risk assessment toolkit: chemical hazards*. 2021: World Health Organization.
- .١٦ Mokoena, M.M., *Microcystins in water containers used in the home: A review of their potential health effects*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024. 269: p. 115787.
- .١٧ EPA, U.S., *Cyanobacteria and Cyanotoxins: Information for Drinking Water Systems*, O.o. Water and M.C. 4304T, Editors. 2019.
- .١٨ Funari E, T.E., *Human health risk assessment related to cyanotoxins exposure*. *Crit Rev Toxicol* 2008. 38(2): p. 97–125.

-
- .۱۹ Azevedo SM, C.W., Jochimsen EM, Rinehart KL ,Lau S, Shaw GR, Eaglesham GK *Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru-Brazil*. Toxicology 2002. 441–446: p. 441–446.
- .۲۰ Pouria S, d.A.A., Barbosa J, Cavalcanti RL, Barreto VT, Ward CJ, Preiser W et a, *Fatal microcystin intoxication in haemodialysis unit in Caruaru, Brazil*. Lancet, 1998. 352(9121): p. 21–26.
- .۲۱ EPA, U.S., *HARMFUL ALGAL BLOOMS AND DRINKING WATER*, E. 810-F-16-006, Editor. 2006.
- .۲۲ ISIRI, *Drinking water -Physical and chemical specification*, in *Institute of Standards and Industrial Research of Iran*, 1053(6). 2024.
- .۲۳ <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/cyanotoxins-drinking-water>.
- .۲۴ Agency, U.S.E.P., *Handbook for non-cancer health effects evaluation*. 2000, US Environmental Protection Agency Washington, DC.
- .۲۵ EPA, U., *Risk assessment guidance for superfund*. Human Health Evaluation Manual Part A, 1989.
- .۲۶ Assessment, C.R., *Proposed guidelines for carcinogen risk assessment*. Federal Register, 1996. 61(79): p. 17960–18011.
- .۲۷ EPA, U., *Guidelines for Carcinogen Risk Assessment*. 51 FR 33992–34003. Environmental Protection Agency, Washington, DC, US, 1986.
- .۲۸ Shamsollahi HR, A.M., Nabizadeh R, Nazmara S, Mahvi AH, *Measurement of microcystin-LR in water samples using improved HPLC method*. Global journal of health science., 2015. 7.(۲)
- .۲۹ D.C. Oliveira E, C.-B.R., Silva L, Silva N, Azevedo J, Vasconcelos V, et al, *First Detection of Microcystin-LR in the Amazon River at the Drinking Water Treatment Plant of the Municipality of Macapá, Brazil*. Toxins, 2019. 11(11): p. 669.
- .۳۰ Pedro O, L.E., Correia D, Neves L, Skaare JU, Sandvik M, et al, *Quantification of microcystin-producing microcystis in freshwater bodies in the Southern Mozambique using quantitative real time polymerase chain reaction*. African Journal of Biotechnology, 2013. 12.
- .۳۱ Malta JF, N.A., Razzolini MTP, Diniz V, Cunha DGF, *Exposure to microcystin-LR in tropical reservoirs for water supply poses high risks for children and adults*. Environmental Monitoring and Assessment, 2022 : (۴) ۱۹۴ .p. 253.
- .۳۲ Zamyadi A, H.R., Stuetz R, Hofmann R, Ho L, Newcombe G, *Fate of geosmin and 2-methylisoborneol in full-scale water treatment plants*. . Water research, 2015. 83: p. 171–83.
- .۳۳ Wert EC, K.J., Trenholm RA, Rosario-Ortiz FL, *Effect of oxidant exposure on the release of intracellular microcystin, MIB, and geosmin from three cyanobacteria species*. Water research. 2014;52:251-9., 2014. 52: p. 251.
- .۳۴ Organization, W.H., *Guidelines for safe recreational water environments: Coastal and fresh waters*. World Health Organization, 2003. 1.
- .۳۵ Baird R, R.E., Eaton A, *Standard methods for the examination of water and wastewaters*. 2023.
- .۳۶ Organization, W.H., *WHO human health risk assessment toolkit: chemical hazards*. 2021.