دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال چهاردهم، شماره‌ی ۵۵
پاییز ۱۴۰۲، صفحات ۱۵-۱

اوتروفیکاسیون در منابع آبی: تعریف، انواع، علل،اثرات اکولوژیکی و راهکارهای کنترل

محمد صفری
دانشکده پزشکی، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران
بهزاد محمدی خانقاهی
کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
غلامحسین صفری*
مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
Email: hsafari13@yahoo.com

دریافت ۱۴۰۲/۰۲/۲۷ پذیرش ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

چکیده

یکی از رایج ترین مشکلات مدیریت کیفیت آب دریاچه‌ها و مخازن در سراسر جهان است. حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از دریاچه‌ها و مخازن در سراسر جهان تحت تأثیر غلظت غیر طبیعی مواد مغذی بالا قرار دارند. اوتروفیکاسیون پدیده‌ای است که در اثر تخلیه بیش از حد مواد مغذی در یک سیستم آبی، به‌ویژه توسط نیتروژن و فسفر، به‌ویژه در دریاچه‌ها، مصب‌ها و جریان‌های آهسته ایجاد می‌شود. به دلیل مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی و تخلیه فاضلاب های شهری و صنعتی تصفیه نشده به منابع آبی، وسعت فرآیندهای اوتروفیکاسیون از اواسط قرن گذشته به طور قابل توجهی افزایش یافته است. یکی از نشانه‌های بارز اوتروفیکاسیون شکوفایی متراکم جلبکی است که باعث کدورت زیاد در سیستم‌های آبی، کاهش اکسیژن و افزایش شرایط هیپوکسی در قسمت‌های عمیق‌تر بدنه‌های آبی به دلیل تجزیه گیاهان در رسوبات می‌شوند. علاوه بر این، توسعه انبوه سیانوباکتری‌های مضر (جلبک‌های سبز آبی)، کاهش تنوع گونه‌ها، تشکیل سولفید هیدروژن، افزایش مرگ و میر ماهی‌ها، بوی ناخوشایند و افزایش فیتوپلانکتون‌ها و سایر گیاهان آبزی از دیگر اثرات اتروفیکاسیون بر اکوسیستم می‌باشد. مواد مغذی اصلی مورد توجه نیتروژن و فسفر هستند که هر دو برای رشد جلبک‌ها ضروری هستند، اما نقش فسفر حیاتی‌تر است زیرا بسیاری از سیانوباکتری‌ها می‌توانند نیتروژن مورد نیاز خود را از نیتروژن موجود در جو از طریق تثبیت نیتروژن تامین کنند. از این رو اکثر اقدامات کنترلی اتروفیکاسیون به سمت کاهش فسفر هدایت می‌شوند. هدف از این مقاله مروری بررسی انواع، علل، مراحل و اثرات و در نهایت راهکارهایی کنترل، اصلاح و پیشگیری فرایند اتروفیکاسیون می‌باشد.

کلید واژه: اتروفیکاسیون، شکوفایی جلبک، مواد مغذی؛ کیفیت آب؛ سیانوباکتری‌ها.

مقدمه

اوتروفیکاسیون اختلال در اکوسیستم‌های آبی با مواد مغذی بیش از حد یا یک اکوسیستم مختل است که منجر به شکوفایی جلبک ها و رویدادهای بی اکسیژن می‌شود. به طور گسترده‌ای پذیرفته شده است که اتروفیکاسیون یک شرایط سرسخت برای آب های سطحی در سراسر جهان است [۲-۱]. تغییرات عظیم اکولوژیکی دریاچه می تواند بر منابع آب، شیلات، بهره وری مراتع و همچنین سایر خدمات اکوسیستمی تأثیر بگذارد. همچنین اعتقاد بر این است که اتروفیکاسیون دریاچه یک تغییر رژیم از وضعیت پاک به وضعیت کدر است. مطالعات قبلی ثابت کردند که چنین تغییراتی را می‌توان به حالت‌های پایدار جایگزین نسبت داد [۳-۴]. به طور خاص، یک دریاچه اولیگوتروف در یک رژیم پاک است، در حالی که یک دریاچه اوتروفیک رژیمی پایدار است که با آب کدر و یک اکوسیستم آبی غالب جلبک‌ها مشخص می‌شود [۵]. تغییر رژیم همیشه به طور غیرمنتظره رخ می دهد و از روندهای غیرخطی پیروی می کند. تئوری‌های انعطاف‌پذیری و بازیابی اکولوژیکی نشان داد که هنگامی که اتروفیکاسیون در دریاچه رخ می‌دهد، معمولاً زمان بیشتری یا هزینه‌های بالاتری برای بازگرداندن آن به حالت اولیگوتروفیک یا آب تمیز قبل از آشفتگی صرف می‌شود [۶ -۷].

اوتروفیکاسیون[1] افزایش تدریجی غلظت فسفر، نیتروژن و سایر مواد مغذی گیاهی در یک اکوسیستم آبی پیر مانند یک دریاچه است. بهره وری یا حاصلخیزی چنین اکوسیستمی به طور طبیعی با افزایش مقدار مواد آلی که می‌توانند به مواد مغذی تجزیه شوند افزایش می‌یابد [۸].. این ماده عمدتاً از طریق رواناب از زمین وارد اکوسیستم می‌شود که باقیمانده‌ها و محصولات تولید مثل و مرگ موجودات زمینی را حمل می‌کند. شکوفه‌های آب، یا غلظت زیاد جلبک‌ها و موجودات میکروسکوپی، اغلب روی سطح ایجاد می شوند و از نفوذ نور و جذب اکسیژن لازم برای زندگی در زیر آب جلوگیری می‌کنند. آب‌های اوتروفیک اغلب کدر هستند و ممکن است حیوانات بزرگ کم‌تری مانند ماهی و پرندگان را نسبت به آب‌های غیر اوتروفیک نگه دارند [۸].

در حقیقت، اتروفیکاسیون و افزایش بهره وری اولیه (تروفی) در یک بدنه آبی به دلیل افزایش دسترسی یا استفاده از مواد مغذی، یکی از رایج ترین مشکلات مدیریت کیفیت آب دریاچه ها و مخازن در سراسر جهان است. حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از دریاچه‌ها و مخازن در سراسر جهان تحت تأثیر غلظت غیر طبیعی مواد مغذی بالا قرار دارند [۹]. اوتروفیکاسیون بدنه‌های آبی سال‌هاست که به عنوان یک مشکل آلودگی در سراسر جهان در نظر گرفته شده است که در اثر تخلیه بیش از حد مواد مغذی در یک سیستم آبی، به‌ویژه توسط نیتروژن و فسفر، به‌ویژه در دریاچه‌ها، مصب‌ها و جریان‌های آهسته حرکت ایجاد می‌شود [۱۰]. افزایش ورودی‌های جهانی کودهای نیتروژنی و استخراج سنگ‌های فسفاته، نگرانی‌های بیشتری را در مورد اثرات اوتروفیکاسیون بر اکوسیستم‌های دریایی محصور ایجاد کرده است [۱۱-۱۲]. اکوسیستم‌های اوتروفیک تولید جلبک بیش از ۳۰۰ گرم در مترمربع در سال دارند که منجر به مناطقی از آنوکسیک (بی‌اکسیژنی) و از بین رفتن زیستگاه ماهی ها و سایر موجودات می شود [۱۳, ۱۴].

در فرایند اوتروفیکاسیون انتشار مواد مغذی عمدتا از طریق آب، بلکه طریق هوا نیز صورت می‌گیرد، که به سایر اکوسیستم‌ها نیز راه پیدا می‌کند و بر الگوهای رشد نسبی آنها تأثیر می‌گذارد و تهدیدی برای تنوع زیستی است. این تاثیرات زمانی رخ می‌دهد که جمعیت میکروارگانیسم‌ها و جلبک‌ها در یک سیستم آبی بیش از حد زیاد باشد که باعث اثرات منفی بر موجودات دیگر مانند ماهی، پرندگان و حتی مردم می‌شود [۱۵].

اوتروفیکاسیون با رشد بیش از حد گیاهان و جلبک ها به دلیل افزایش دسترسی به یک یا چند فاکتور رشد محدود کننده مورد نیاز برای فتوسنتز [۱۶]، مانند نور خورشید، دی اکسید

[1] Eutrophication

کربن و کودهای مغذی مشخص می شود و گاهی اوقات به عنوان افزایش در میزان تولید آلی یا افزایش کل کربن آلی تعریف می‌شود.. اتروفیکاسیون به طور طبیعی در طول قرن‌ها با پیر شدن دریاچه ها و پر شدن از رسوبات رخ می‌دهد. اوتروفیکاسیون فرآیند طبیعی پیری اکوسیستم‌های آبی است که از لحاظ تاریخی در اشاره به پیری طبیعی دریاچه‌ها استفاده می‌شود و در حقیقت یک فرآیند آهسته و طبیعی در تاریخ زمین شناسی یک دریاچه است اگرچه در سال‌های اخیر توسط فعالیت‌های انسانی تسریع شده است [۱۸- ۱۷]. بنابراین، درجه اوتروفیکاسیون به اصطلاح یک فلش زمان در اکوسیستم‌های آبی است. از این رو اوتروفیکاسیون را می-توان به عنوان یک زمان مشخص در سلسله مراتبی از اکوسیستم‌های آبی در نظر گرفت [۱۹]. فعالیت‌های انسانی از طریق تخلیه‌های نقطه‌ای و بارهای غیرنقطه‌ای مواد مغذی محدودکننده، مانند نیتروژن و فسفر، منجر به رشد بیش از حد جلبک‌ها، تجمع زیست‌توده، کاهش تنوع زیستی و در نتیجه تسریع در سرعت و میزان اتروفیکاسیون در اکوسیستم‌های آبی شده است. که پیامدهای چشمگیری برای منابع آب آشامیدنی، شیلات و آب‌های تفریحی دارند [۱۸- ۹]. وسعت فرآیندهای اوتروفیکاسیون از اواسط قرن گذشته به طور قابل توجهی در نتیجه فعالیت‌های انسانی افزایش یافته است. این تغییرات شگرف در حالت تغذیه‌ای، اتروفیکاسیون مصنوعی[۲] یا انسان زا نامیده می‌شود، که در آن فرآیند پیری طبیعی توسط فعالیت‌های انسانی تا حد زیادی تسریع می‌یابد و به وضوح می‌توان آن را از اتروفیکاسیون طبیعی که در طول پیری یک دریاچه طی هزاران سال رخ می‌دهد، جدا کرد [۹- ۱۷- ۱۸].

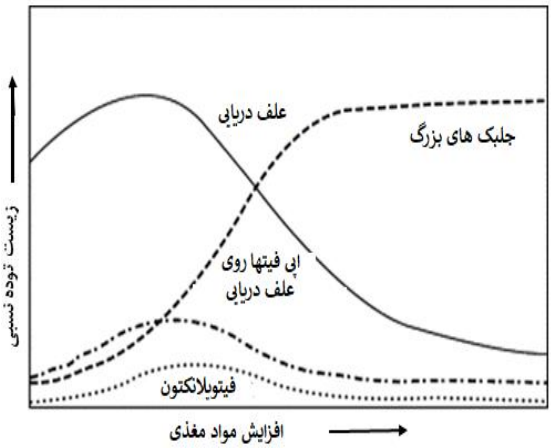
اتروفیکاسیون مصنوعی زمانی اتفاق می‌افتد که انسان با وارد کردن فاضلاب، مواد شوینده، کودها و سایر منابع غذایی به اکوسیستم، روند پیری را تسریع کند. اتروفیکاسیون مصنوعی عواقب چشمگیری بر منابع آب شیرین، شیلات و منابع آبی تفریحی داشته است و یکی از علل اصلی تخریب اکوسیستم آبی است. معمولاً سیستم‌های آبی اوتروفیک از نظر مصنوعی ممکن است غلظت اکسیژن بسیار پایین را در آب‌های پایین نشان دهند، وضعیتی که به عنوان هیپوکسی شناخته می‌شود. این امر به ویژه در مورد سیستم‌های طبقه بندی شده دمایی، به عنوان مثال، دریاچه‌ها در طول تابستان که غلظت اکسیژن مولکولی ممکن است به سطوح کمتر از حد آستانه برای فرآیندهای مختلف بیولوژیکی و شیمیایی (یک میلی گرم در لیتر) برسد صادق است. سطوح پایین اکسیژن می‌تواند بیش‌تر با شکوفه های آب تشدید شود که اغلب با بارگیری مواد مغذی آب‌ها همراه است و ممکن است حیات وحش را مسموم کند. در مناطقی چون دریای سیاه ، آب‌های هیپوکسیک ناشی از اتروفیکاسیون مصنوعی منجر به کشتار گسترده ماهی‌ها، با اثرات موج‌دار در سراسر زنجیره غذایی و اقتصادهای محلی شده است [۲۱- ۲۰- ۸].

سیستم‌های دریایی ساحلی نیز ممکن است تحت تأثیر این فرآیند قرار گیرند. در مقیاس جهانی، ورودی مواد آلی توسط رودخانه‌ها به اقیانوس‌ها امروزه دو برابر ورودی دوران قبل از انسان است و شار نیتروژن همراه با فسفر بیش از دو برابر شده است. این بارگذاری بیش از حد کربن، نیتروژن و فسفر منجر به اتروفیکاسیون مصنوعی در بسیاری ازاکوسیستم‌های دریایی، [۲۱- ۱۱- ۸].

اوتروفیکاسیون ترکیب و تنوع گیاهان آبزی را تغییر می‌دهد و بر ساختار اکوسیستم و شبکه تغذیه‌ای تأثیر می‌گذارد (شکل ۱). افزایش ورودی‌ها می‌تواند ترکیب جلبک‌ها را در دریاچه‌های آب شیرین اولیگوتروف از سیستم‌های تحت سلطه دیاتومه‌ها، به سیستم‌های تحت سلطه جلبک‌های سبز آبی تغییر دهد. جلبک های سبز آبی سموم آزاد می کنند و به راحتی توسط مصرف کنندگان ثانویه بلعیده نمی‌شوند. علاوه بر این، بسیاری از جلبک‌های سبز- آبی حاوی واکوئل‌های پر از گاز هستند که باعث شناور شدن جلبک‌ها و تجمع آن‌ها در سطح آب می‌شود و به طور موثر بر آب‌های پایینی سایه می‌اندازد و بسیاری از گونه‌های مهم گیاهی

[2] Cultural eutrophication

غوطه‌ور را از بین می‌برد. وجود توده‌های پوسیده جلبک‌های سبز آبی در خط ساحلی دریاچه‌های قبلا شفاف، نشان می‌دهد فرسایش سریع اکوسیستم یک دریاچه را فراگرفته است. در مصب‌ها و خلیج‌های دریایی ساحلی، اتروفیکاسیون با شکوفه‌های جلبکی مضر – که اغلب «جذر و مد قرمز»[3] نامیده می‌شوند، مرتبط است که باعث تلفات گسترده در ماهی‌ها و دیگر موجودات دریایی می‌شود [۲۲].



شکل ۱: افزایش مواد مغذی در سیستم‌های دریایی کم‌عمق می‌تواند جوامع گیاهان آبزی را از بسترهای علف‌دریایی که زیستگاه‌های ارزشمندی را برای موجودات دریایی فراهم می‌کنند، به جلبک‌های درشت آزاردهنده که رسوبات را با زیست توده پوسیده می‌پوشانند، تغییر دهد. غنی‌سازی مواد مغذی، رشد فیتوپلانکتون‌ها را در ستون آب و جلبک‌های متصل (اپی‌فیت‌ها) روی علف‌های دریا را تحریک می‌کند و نفوذ نور را به زیر سطوح برای پایداری علف‌های دریایی محدود می‌کند.

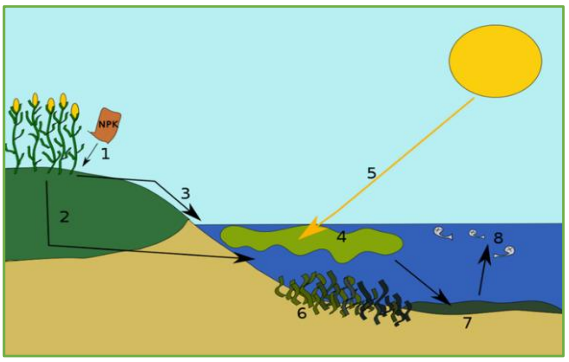
در چند دهه اخیر، اتروفیکاسیون دریایی یک مشکل بزرگ است که در سطح جهانی با آن مواجه است. اوتروفیکاسیون دریایی عمدتاً به دلیل وجود نیتروژن و فسفر در آب است. وجود آن در آب‌های دریایی منجر به هیپوکسی و آنکسی، کاهش کیفیت آب، تخریب زیستگاه، از بین رفتن ساختار شبکه غذایی، از بین رفتن تنوع زیستی و رشد شکوفه‌های جلبکی مضر می‌شود. در سطوح نرمال نیتروژن و فسفر برای حمایت از رشد گیاهان آبزی از طریق ترویج سنتز پروتئین و سنتز DNA و RNA مورد نیاز است. نیتروژن در اشکال بیولوژیکی مانند نیترات، نیتریت و آمونیوم در خاک و آب موجود است. فسفر به صورت ترکیبات آلی و معدنی موجود است. چرخه نیتروژن و چرخه فسفر در محیط منجر به تثبیت مواد مغذی برای بقا می‌شوند. چرخه نیتروژن شامل اشکال گازی، ذره‌ای و محلول نیتروژن و چرخه فسفر شامل اشکال ذره‌ای و غیرگازی فسفر است. این به وضوح نشان می دهد که نیتروژن می تواند به صورت گازی فرار کند، در حالی که فسفر در محیط دریایی به دام می افتد. کودهای کشاورزی، فسفر خاک بومی، رسوب اتمسفر و فسفر انسانی منبع اصلی نیتروژن و فسفر در محیط های دریایی هستند[۲۳]. نیتروژن و فسفر هر دو به عنوان مواد مغذی اصلی برای رشد جلبک‌ها ضروری هستند و منجر به پتانسیل اوتروفیکاسیون آبی (AEP[4]) می شوند، اما ورود و نقش فسفر حیاتی‌تر است زیرا بسیاری از سیانوباکتری‌ها می‌توانند نیتروژن مورد نیاز خود را از نیتروژن موجود در جو از طریق تثبیت نیتروژن تامین کنند [۱۵-۱۰]. علت افزایش بهره وری در دریاچه‌ها و مخازن به وضوح در بیش‌تر موارد افزایش در دسترس بودن فسفر است، اگر چه عناصر دیگر، به ویژه نیتروژن یا کربن می‌توانند به ماده مغذی محدود کننده غالب برای رشد فیتوپلانکتونیک تبدیل شوند. در سطح جهانی، فسفر اصلی‌ترین محدودیت مواد مغذی برای فتوسنتز محلی بر مبنای طولانی مدت است. ورودی فسفر از منابع نقطه‌ای (به عنوان مثال، تصفیه خانه‌های شهری، فاضلاب صنعتی) یا منابع غیر نقطه‌ای (به عنوان مثال، فرسایش، رسوب اتمسفر، رواناب سطحی، آب‌های زیرزمینی) منشاء می‌گیرد. در نتیجه، اکثر اقدامات کنترلی اتروفیکاسیون و تلاش‌های احیای دریاچه عمدتاً به سمت کاهش بار فسفر و تا حدی نیتروژن به آب‌های سطحی از طریق تصفیه پیشرفته فاضلاب، انحراف، مدیریت زمین، یا کاهش بار فسفر در فاضلاب با محدود کردن میزان فسفر مواد شوینده‌ها هدایت می‌شوند، زیرا در اکثر موارد می‌توان به غلظت‌های محدود کننده این عنصر دست یافت [۲۱- ۹].

[3] Red tides

[4] Aquatic eutrophication potential

تعریف اتروفیکاسیون

اوتروفیکاسیون فرآیندی است که در آن یک بدنه آبی بیش از حد با مواد مغذی غنی می‌شود که منجر به رشد فراوان زندگی گیاهی ساده می‌شود. رشد بیش از حد (یا شکوفه) جلبک‌ها و پلانکتون‌ها در یک بدنه آبی نشانگر این فرآیند است. اوتروفیکاسیون به عنوان یک نگرانی جدی زیست محیطی در نظر گرفته می‌شود زیرا اغلب منجر به بدتر شدن کیفیت آب و کاهش اکسیژن محلول در آب می‌شود. آب‌های اوتروفیک در نهایت می‌توانند به «مناطق مرده» تبدیل شوند که قادر به پشتیبانی از زندگی نیستند. یوتروفیکاسیون معمولاً با تخلیه مواد شوینده حاوی نیترات یا فسفات، کودها یا فاضلاب در یک سیستم آبی ایجاد می‌شود [۲۴]. اوتروفیکاسیون ممکن است به عنوان غنی‌سازی مواد مغذی معدنی آب‌های طبیعی تعریف شود که منجر به افزایش تولید جلبک‌ها و ماکروفیت‌ها می‌شود. بسیاری از دریاچه ها به طور طبیعی اوتروفیک هستند و در برخی موارد با تکامل و بلوغ دریاچه، اوتروفیکاسیون پیشرونده ایجاد می‌شود. اصطلاح اوتروفیکاسیون به طور گسترده در رابطه با فعالیت های انسانی شناخته می‌شود که در آن ورود مصنوعی مواد مغذی گیاهی منجر به تغییرات جامعه و بدتر شدن کیفیت آب در بسیاری از سیستم‌های آب شیرین شده است. این جنبه با افزایش جمعیت انسانی و توسعه گسترده‌تر کشاورزی و اتروفیکاسیون اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است و اکنون با سایر اثرات انسانی عمده مانند جنگل‌زدایی، گرمایش جهانی تخریب لایه ازن و اختلالات محیطی در مقیاس بزرگ در رابطه با اثرات بالقوه مضر آن بر اکوسیستم‌های طبیعی رتبه‌بندی می‌شود. اوتروفیکاسیون در دریاچه‌ها به یک مشکل جهانی آلودگی تبدیل شده است. کلروفیل a، نیتروژن کل، فسفر کل، نیاز اکسیژن بیولوژیکی یا شیمیایی و عمق سکی[5](معیاری برای شفافیت آب که در آن شفافیت با افزایش عمق سکی افزایش می‌یابد) بیش‌ترین شاخص‌ها برای سنجش سطح اوتروفیکاسیون در دریاچه‌ها هستند. در شکل ۲ مکانیسم فرایند اتروفیکاسیون نشان داده شده است [۲۴].



شکل ۲: مکانیسم فرایند اتروفیکاسیون

۱- مواد مغذی اضافی به خاک اعمال می‌شود. ۲- برخی از مواد مغذی به داخل خاک نشت می‌کنند و بعداً به آب های سطحی تخلیه می‌شوند. ۳- برخی از مواد مغذی از روی زمین به داخل بدن آب می‌ریزند. ۴- مواد مغذی اضافی باعث شکوفایی جلبک می‌شود. ۵- شکوفه‌های جلبکی نفوذ نور را کاهش می‌دهند. ۶- گیاهان زیر شکوفه‌های جلبکی می‌میرند زیرا نمی‌توانند نور خورشید را برای انجام فتوسنتز دریافت کنند. ۷- در نهایت شکوفه‌های جلبکی می‌میرند و به کف دریاچه فرو می‌روند. جوامع باکتریایی شروع به تجزیه بقایای آن‌ها می‌کنند و از اکسیژن برای تنفس استفاده می‌کنند. ۸- اگر بدنه آب به طور منظم به طور عمودی مخلوط نشود، تجزیه باعث می‌شود که آب از اکسیژن تهی شود. اشکال زندگی بزرگتر مانند ماهی می‌میرند.

- تاریخچه فرایند اتروفیکاسیون

اوتروفیکاسیون به عنوان یک مشکل آلودگی آب در دریاچه ها و مخازن اروپا و آمریکای شمالی در اواسط قرن بیستم شناخته شد [۲۶]. تحقیقات موفقیت آمیز انجام شده در منطقه دریاچه‌های تجربی (ELA[6]) در انتاریو، کانادا، در دهه ۱۹۷۰ شواهدی را ارائه کرد که بدنه‌های آب شیرین دارای فسفر محدود هستند [۲۷].

[5] Secchi

[6] Experimental Lakes Area

- انواع اوتروفیکاسیون

اوتروفیکاسیون را می توان بر اساس علت اصلی فرآیند به دو دسته طبقه‌بندی کرد:

۱) اوتروفیکاسیون طبیعی

اوتروفیکاسیون طبیعی فرآیندی است که در نتیجه تجمع تدریجی مواد مغذی و مواد آلی در منابع آبی در یک دوره زمانی بسیار طولانی رخ می‌دهد و می‌تواند تا ۱۰۰ سال طول بکشد زیرا رسوب طبیعی و افزایش رسوبات مواد آلی به زمان طولانی نیاز دارد. فرآیند اتروفیکاسیون طبیعی توسط شرایط طبیعی از قبیل سیل‌ها و رانش‌ها زمین، که منجر به شسته شدن مواد آلی از زمین به منابع آبی می‌شود، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، عوامل محیطی مانند دما، غلظت دی اکسیدکربن، و نور نیز نقش اساسی در اوتروفیکاسیون طبیعی دارند. فرآیند اوتروفیکاسیون طبیعی در یک منبع آب اولیگوتروف آغاز می‌شود که در آن بهره وری در نتیجه انباشته و تجمع مواد مغذی برای رسیدن به یک حالت پایدار از اوتروفی، افزایش می‌یابد. با ادامه روند انباشت و استفاده از مواد مغذی، ممکن است وضعیت منبع آبی به سمت اوتروفیکاسیون تغییر کند، اما صدها سال طول می‌کشد. دوره زمانی به ماهیت منبع آب، مناطق زمینی اطراف منبع آب و شرایط آب و هوایی بستگی دارد [۲۹- ۲۴-۲۷].

۲) اتروفیکاسیون مصنوعی (انتروپوژنیک)[7]

اوتروفیکاسیون مصنوعی یا اوتروفیکاسیون انسان زا، فرآیند تجمع مواد مغذی اضافی در اکوسیستم‌های آبی در نتیجه فعالیت‌های انسانی است که باعث تسریع اتروفیکاسیون طبیعی می‌شود و در نتیجه در مدت زمان کوتاهی شرایط شدیدی ایجاد می‌شود. علت اصلی اتروفیکاسیون مصنوعی مجموعه-ای از فعالیت‌های انسانی است که در درجه اول غلظت فسفر و نیتروژن را در اکوسیستم افزایش می‌دهد. این نوع اوتروفیکاسیون در مدت زمان کوتاه‌تری رخ می‌دهد و معمولاً پیامدهای قابل توجهی برای سلامتی همه موجودات زنده دارد. بسیاری از فعالیت‌های انسانی مانند کوددهی بیش از حد، توسعه صنعتی و کشاورزی و تخلیه فاضلاب‌ها به منابع آبی از دلایل اصلی این فرآیند هستند. اتروفیکاسیون مصنوعی می‌تواند در هر دو آب شیرین و آب شور رخ دهد که در میان آن‌ها آب های کم عمق حساس‌ترین هستند. دریاچه‌ها و برکه‌های کم عمق امواج باد را تجربه می‌کنند که منجر به سوسپانسیونی از مواد مغذی حجیم در سطح فوقانی آب می‌شود. پدیده اتروفیکاسیون استفاده از چنین منابع آبی را برای اهداف مختلف مانند شرب، آبزیان و استفاده صنعتی در نتیجه رشد بیشتر جلبک های نامطلوب محدود می کند [۳۴-۳۰-۲۴].

- علل و مکانیسم‌های اوتروفیکاسیون

اوتروفیکاسیون طبیعی یک فرآیند طبیعی است که طی قرن ها به عنوان بخشی از چرخه اکوسیستم رخ می‌دهد. با این حال، این فرآیند توسط فعالیت‌های انسانی افزایش یافته است که باعث می‌شود فرآیند با سرعت بسیار بالاتری همراه با پیامدهای فوری رخ دهد. علت اصلی اوتروفیکاسیون، ورود مقدار زیادی از مواد مغذی آسان در دسترس به منابع آبی است که باعث افزایش باروری و رشد بیش از حد گیاهان و جلبک‌های مختلف می‌شود. برخی از عواملی که با افزایش محتوای مواد مغذی منابع آب باعث افزایش فرآیند اوتروفیکاسیون می‌شوند عبارتند از:

- مصرف کودهای شیمیایی[8]

استفاده از کودهای حاوی فسفات و نیترات به منظور افزایش بهره‌وری محصولات زراعی یکی از علل اصلی اتروفیکاسیون مصنوعی[9]است. کودهای مورد استفاده در زمین‌های نزدیک به منابع آب در نهایت در طی بارندگی و سایر فرآیندهای طبیعی به منابع آبی انتقال می‌یابند. رواناب-های ناشی از مناطق مختلف، در نهایت وارد دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و اقیانوس‌ها می‌شوند و منجر به افزایش در دسترس بودن مواد مغذی منابع آب می‌شود. از آنجایی که

[7] Anthropogenic

[8] Fertilizers

[9] Cultural Eutrophication

کودهای حاوی مواد مغذی به راحتی در دسترس هستند، آن-ها توسط پلانکتون‌ها، جلبک‌ها و گیاهان آبزی اکوسیستم آبی جذب می‌شوند. فعالیت فتوسنتزی منابع آب افزایش می یابد که باعث افزایش بیش‌تر غلظت مواد آلی در اکوسیستم می‌شود. افزایش محتوای مواد مغذی باعث تشکیل رشد متراکم شکوفه‌های جلبکی و زندگی گیاهی و در نتیجه اوتروفیکاسیون می‌شود [۳۵-۳۶].

- متمرکز نمودن تغذیه دام

متمرکز نمودن تغذیه حیوانات یک عملیات کشاورزی است که در آن تعداد زیادی از حیوانات در یک منطقه معین برای مدت زمان معینی محصور می شوند تا بهره وری و کیفیت دام افزایش یابد. عملیات‌هایی از این قبیل سالانه میلیون‌ها تن کود تولید می‌کنند که همگی در نهایت به منابع آب راه پیدا می‌کنند. کود دامی عمدتاً حاوی نیتروژن و فسفر است که هر دو از عناصر ضروری شکوفایی جلبکی هستند. نیتروژن و فسفر به‌عنوان عوامل محدودکننده در شکوفایی جلبکی عمل می‌کنند، زیرا این عوامل در کمترین نسبت در فرمول مولکولی جلبک‌ها ($C_{106}H_{262}O_{110}N_{16}P$) وجود دارند. بنابراین، در بسیاری از اکوسیستم‌ها، زیست توده فیتوپلانکتون به دلیل دسترسی کم فسفر و نیتروژن محدود می شود. با این حال، رهاسازی کود حیوانی غنی از نیتروژن و فسفر به چنین اکوسیستم‌هایی باعث افزایش تولید فیتوپلانکتون‌ها می‌شود که منجر به ایجاد اوتروفیکاسیون می‌شود [۳۵-۳۶].

- تخلیه فاضلاب‌های خانگی و صنعتی

در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، فاضلاب خانگی و همچنین فاضلاب صنعتی به منابع آبی مانند دریاچه‌ها، برکه ها و رودخانه‌ها رها می‌شود. فاضلاب ورودی از منابع مختلف دارای مقادیر بالایی از مواد مغذی شیمیایی است که باعث تحریک رشد متراکم شکوفایی جلبکی در چنین منابعی می شود. فاضلاب خانگی و شهری دارای غلظت بالایی از نیتروژن و فسفر است که تأثیر مستقیمی بر سلامت اکوسیستم دارد. فاضلاب صنعتی، حتی در صورت تصفیه، حاوی غلظت‌های پایینی از بسیاری از مواد شیمیایی هستند. با گذشت زمان، رسوب و ته نشست مداوم چنین مواد شیمیایی منجر به افزایش در دسترس بودن مواد مغذی در منابع آبی می شود و در نهایت منجر به اتروفیکاسیون می‌شود [۳۶-۳۵].

- عوامل محیطی

عوامل مختلف محیطی از قبیل دما، شوری، و شرایط جوی نقش اساسی در اتروفیکاسیون دارند، اما مکانیسم دقیق تأثیر آن‌ها هنوز به طور کامل شناخته نشده است. شکوفایی جلبکی معمولاً بین دمای ۲۳ تا ۲۸ درجه سلسیوس و میزان شوری ۲۳ تا ۲۸ درصد رخ می‌دهد. تغییرات این عوامل بر سرعت رشد جلبک تأثیر می‌گذارد، به ویژه زمانی که دما افزایش و شوری کاهش می‌یابد. غلظت دی اکسیدکربن نیز بر رشد سیانوباکتری‌ها تأثیر می‌گذارد زیرا این میکروب‌ها می‌توانند از سطوح پایین دی اکسیدکربن استفاده کرده و تا خود را روی سطح آب شناور نگه دارند و نور خورشید را دریافت کنند. همچنین غلظت دی اکسیدکربن آزاد در آب بر میزان pH منبع آبی و در نهایت بر رشد میکروب‌های مختلف تأثیر می‌گذارد. به طور مشابه، رشد نیز با افزایش شدت نور به ۴۰۰۰ لوکس (شدت نور بهینه)، بهبود می‌یابد [۳۶-۳۷].

فرآیند/ مراحل اوتروفیکاسیون

فرآیند کلی اوتروفیکاسیون را می‌توان مطابق با شکل ۳ به صورت زیر توصیف کرد [۲۴]:

۱- تجمع مواد مغذی

اولین مرحله در فرآیند اوتروفیکاسیون، تجمع مواد مغذی در اکوسیستم‌های مختلف است. این مواد مغذی معمولاً غنی از نیتروژن و فسفر هستند که دو عنصر محدود کننده در شکوفایی جلبکی هستند. تجمع مواد مغذیی با روش‌های مختلف طبیعی و همچنین مصنوعی (انسانی) حاصل می‌شود. فرآیندهای طبیعی مانند فرسایش خاک، رانش زمین، باران و طوفان‌ها، خاک را از زمین مجاور به منابع آبی منتقل می‌کنند که به طور قابل توجهی محتوای مواد مغذی منابع مربوطه را افزایش می‌دهند. فعالیت‌های انسانی مانند رهاسازی فاضلاب‌های خانگی و صنعتی به منابع آبی و گسترش مناطق

کشاورزی و مسکونی به طور مستقیم یا غیرمستقیم منجر به تجمع مواد مغذی در منابع آبی مجاور می‌شود. در ابتدای فرآیند، اکوسیستم آبی الیگوتروف با مواد مغذی کم‌تری در دسترس است. همانطور که غلظت مواد مغذی شروع به رشد می‌کند، میکروب‌ها و گونه های گیاهی از مواد مغذی برای افزایش بهره‌وری خود استفاده می‌کنند [۳۷-۳۸].

۲- افزایش بهره وری

افزایش غلظت مواد مغذی در سیستم آبی باعث افزایش تولید فیتوپلانکتون و همچنین گونه‌های گیاهی می‌شود. یک اکوسیستم آبی از گروه متنوعی از میکروارگانیسم‌ها تشکیل شده است که می‌توانند از انواع مواد مغذی پیچیده و همچنین ساده استفاده کنند. زیست توده میکروارگانیسم‌ها و همچنین گونه‌های گیاهی به طور قابل توجهی در اکوسیستم افزایش می‌یابد. با شروع مرگ موجودات زنده ، زیست توده بیش-تری در اکوسیستم انباشته می‌شود. تا زمانی که غلظت مواد مغذی در اکوسیستم کافی باشد، این فرآیند ادامه می‌یابد [۳۸-۳۹].

۳- تشکیل شکوفایی جلبکی

با افزایش بهره‌وری جلبک‌ها، شکوفایی جلبکی در سطح منابع آبی شروع به شکل‌گیری می‌کنند. تشکیل شکوفایی جلبکی همچنین منجر به دور تسلسل شکوفایی جلبکی[1] نیز می‌شود که مواد مغذی بیش‌تری را در آب آزاد می‌کند. جلبک‌های موجود در آب به اندازه کافی نور خورشید را دریافت می‌کنند که آنها را قادر می‌سازد تا اکسیژن و همچنین مواد مغذی را از طریق فتوسنتز تولید کنند. این امر باعث افزایش جمعیت جلبک‌ها و در نتیجه شکوفایی جلبک‌ها در سطح آب می‌شود. در نهایت، این جلبک‌ها شروع به پوشاندن بیش‌تر سطح آب می‌کنند و باعث عدم نفوذ نور خورشید به داخل آب می‌شوند. این فرآیند فتوسنتز را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در نتیجه باعث کاهش اکسیژن می‌شود. متعاقب این، جلبک‌ها می‌میرند و سپس توسط باکتری‌های مختلف با استفاده از اکسیژن باقی مانده برای تنفس تجزیه می‌شوند. همه این‌ها در نهایت باعث کاهش سلامت آبزیان در چنین منابع آبی و همچنین کیفیت آب می‌شود [۳۷-۳۹].

شکل ۳: فرایند اتروفیکاسیون

- اثرات/ مشکلات اوتروفیکاسیون

اوتروفیکاسیون یک مشکل آلودگی آب در نظر گرفته می-شود که حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از کل بدنه‌های آبی جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر آلودگی آب، چندین اثر دیگر از اوتروفیکاسیون بر اکوسیستم و همچنین زندگی موجودات زنده مختلف وجود دارد. برخی از مهم‌ترین اثرات اوتروفیکاسیون عبارتند از [۳۷- ۲۷-۳۵- ۲۴]:

- فیتوپلانکتون‌ها در چنین شرایطی بسیار سریعتر رشد می-کنند. این گونه‌های فیتوپلانکتون سمی و غیرقابل خوردن هستند.
- زئوپلانکتون‌های ژلاتینی به سرعت در این آب‌ها شکوفا می‌شوند.
- افزایش زیست توده جلبک‌های اپی‌فیتیک و بنتیک دریا را می‌توان در آب‌های اوتروفیک مشاهده کرد.
- تغییرات قابل‌توجهی در ترکیب گونه‌ای ماکروفیت‌ها و زیست توده ایجاد می‌شود.
- آب شفافیت خود را از دست می‌دهد و بو و رنگ بدی پیدا می‌کند. تصفیه این آب سخت می‌شود.

[1] Vicious algal bloom cycle

- اکسیژن محلول در بدنه آبی کاهش می‌یابد.
- حوادث مکرر کشتار ماهی رخ می‌دهد و بسیاری از گونه-های مطلوب ماهی از بدنه آبی حذف می‌شوند.
- جمعیت صدف‌ها و ماهی‌های قابل برداشت کاهش می‌یابد.
- ارزش زیبایی‌شناختی بدنه آبی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

- اثرات اکولوژیکی

الف) اثر بر اکوسیستم‌های آبی

- افزایش زیست توده فیتوپلانکتون‌ها

افزایش زیست توده فیتوپلانکتون، به ویژه به شکل شکوفایی جلبکی، یکی از برجسته‌ترین اثرات اوتروفیکاسیون است. شکوفایی جلبکی حتی ممکن است گونه‌های سمی سیانوباکتری ایجاد کنند که هم به موجودات آبزی و هم به انسان آسیب می‌رساند. شکوفایی جلبکی همچنین باعث کاهش شفافیت آب و کاهش کیفیت آب می‌شوند. برخی از فیتوپلانکتون‌ها حتی ممکن است شکوفه‌های جلبکی بدبو را تشکیل دهند که بر اکوسیستم تأثیر می‌گذارد [۳۷].

- کاهش اکسیژن

تشکیل شکوفایی جلبکی بر روی سطوح آب، دسترسی به نور خورشید را برای موجودات زنده موجود در منبع آب کاهش می‌دهد. کمبود نور خورشید باعث کاهش فتوسنتز و در نهایت مرگ گونه‌های گیاهی موجود در آب می‌شود. سپس گیاهان مرده توسط باکتری‌های مختلف تجزیه می-شوند که از اکسیژن باقی‌مانده در آب استفاده می‌کنند. همه این‌ها منجر به کاهش اکسیژن محلول در منابع آبی می‌شوند که مجموعه‌ای از مشکلات دیگر را به همراه دارد. کمبود اکسیژن منجر به فرآیند آنوکسیک[1]می‌شود که گازهای مختلف سمی و بدبو تولید می‌کند. کاهش اکسیژن باعث مرگ گیاهان مختلف آبزی و همچنین حیوانات می‌شود [۳۷].

- کاهش تنوع زیستی

تنوع زیستی اکوسیستم‌های آبی در نتیجه اوتروفیکاسیون کاهش می‌یابد. با افزایش جمعیت جلبک‌ها در نتیجه افزایش مواد مغذی، جمعیت سایر موجودات زنده مانند گیاهان و حیوانات نیز کاهش می‌یابد. شکوفایی جلبکی دسترسی به نور خورشید را برای موجودات ساکن در لایه‌های پایینی آب محدود می‌کند و منجر به کاهش تنوع جمعیت می‌شود [۲۴-۲۷-۳۵- ۳۷].

- سمیت

شکوفه‌های جلبکی مختلف به عنوان شکوفه‌های مضر جلبکی شناخته می‌شوند که ترکیبی سمی تولید می‌کنند که می‌تواند در زنجیره غذایی به سطوح مختلف تغذیه‌ای راه پیدا کنند. شکوفه‌ها در آب شیرین در صورت خورده شدن توسط حیوانات می‌توانند برای دام مضر باشند. سپس ترکیبات سمی از حیوانات به انسان منتقل می‌شود و سلامت انسان‌ها را تهدید می‌کند. یکی از نمونه‌های رایج سموم جلبکی که بر بدن انسان تأثیر می‌گذارد، مسمومیت با صدف‌ها است، که در آن سموم تولید شده توسط جلبک‌ها توسط صدف‌ها جذب شده و به انسان‌هایی که از چنین صدف‌هایی تغذیه می‌کنند، منتقل می‌شود [۳۴- ۲۷- ۲۴].

- آلودگی آب

تشکیل شکوایی جلبکی شفافیت آب را کاهش می‌دهد و در نتیجه باعث آلودگی گسترده آب می‌شود. آب ایمنی خود را برای آشامیدن یا هر گونه فعالیت تفریحی دیگر از دست می-دهد و در نهایت ارزش زیبایی شناختی بدنه آبی کاهش می-یابد [۳۷، ۳۵].

- اسیدی شدن اقیانوس

آب بدون اکسیژن و هیپوکسیک با تغییر دی اکسید کربن مرتبط هستند و باعث اسیدی شدن اقیانوس می‌شوند که شیمی اقیانوس ها را تغییر می‌دهد و در انتشار دی اکسید کربن به جو دخالت می‌کند. اسیدی شدن اقیانوس‌ها موجودات

[1] Anoxic

آهکی مانند نرم تنان و سخت پوستان را تحت تأثیر قرار می دهد [۴۰].

- مناطق مرده

شرایط هیپوکسیک و بدون اکسیژن با از بین بردن موجودات و کاهش تنوع زیستی منجر به تشکیل مناطق مرده می‌شود. این امر تجمع ذرات آلی معلق را تغییر می‌دهد، مسیرهای بیوشیمیایی میکروبی را تغییر می‌دهد و منجر به مصرف اکسیژن محلول در آب‌های کف می‌شود و در نتیجه باعث مرگ ماهی‌ها و سایر موجودات دریایی می‌شود [۴۰- ۳۵].

- تهاجم گونه های جدید

یک ماده مغذی محدود کننده مربوط به یک بدنه آبی را می-توان با فرآیند اوتروفیکاسیون به وفور ایجاد کرد که منجر به تغییر در ترکیب گونه‌ای بدنه آبی و اکوسیستم اطراف آن می شود. اگر بدنه آبی حاوی کمبود نیتروژن، به طور ناگهانی با نیتروژن غنی شود، بسیاری از گونه‌های رقابتی دیگر ممکن است به بدنه آبی نقل مکان کنند و با ساکنان اصلی اکوسیستم رقابت کنند. یکی از این نمونه‌ها از گونه جدیدی که به شرایط اوتروفیک حمله می‌کند، کپور معمولی است که با این شرایط سازگار شده است [۳۷، ۲۷، ۲۴].

- اثر بر اکوسیستم‌های خشکی

اوتروفیکاسیون اثر نامطلوبی بر اکوسیستم خشکی دارد. افزایش نیترات در خاک اغلب برای گیاهان نامطلوب است. بسیاری از گونه‌های گیاهی خشکزی در نتیجه فرسایش خاک در خطر انقراض هستند. مراتع، جنگل‌ها و باتلاق‌ها معمولاً محتوای مواد مغذی کمی دارند و گونه هایی که به آهستگی در حال رشد هستند با این سطوح سازگار می شوند. انواع شیمیایی نیتروژن به دلیل اوتروفیکاسیون یک موضوع نگران‌کننده است. اکوسیستم‌های خشکی معتقدند که فرآیند آلی میکروبی N_2را به اشکال دیگر مانند نیترات‌ها تبدیل می-کند. با این حال، محدودیتی برای میزان استفاده از نیتروژن وجود دارد. اکوسیستم‌هایی که مقدار نیتروژن بیش‌تری نسبت به نیاز گیاهان دریافت می کنند، از نیتروژن اشباع می-شوند. از این رو، اکوسیستم های خاکی اشباع از نیتروژن به اتروفیکاسیون آب‌های ساحلی، شیرین و دریایی کمک می-کنند [۲۷].

- اثرات اقتصادی

اوتروفیکاسیون و شکوفه‌های جلبکی مضر می‌تواند اثرات اقتصادی به دلیل افزایش هزینه‌های تصفیه آب، تلفات ماهیگیری تجاری و صدف، تلفات ماهیگیری تفریحی (کاهش ماهی و صدف‌های قابل برداشت) کاهش درآمد گردشگری (کاهش ارزش زیبایی شناختی درک شده از بدنه آبی) داشته باشد. هزینه‌های تصفیه آب به دلیل کاهش شفافیت آب (افزایش کدورت) قابل افزایش است. همچنین ممکن است در هنگام تصفیه آب آشامیدنی مشکلاتی چون رنگ و بو وجود داشته باشد [۴۰].

- اثرات سلامتی

اثرات سلامتی انسان شامل نیترات اضافی در آب آشامیدنی است که می‌تواند منجر به سندرم بچه آبی[۲] یا متهموگلوبینمیا (MetHb[۳]) شود. گندزدایی آب آشامیدنی حاوی جلبک-های سمی منجر به تشکیل محصولات جانبی گندزدایی در آب آشامیدنی و مواد شیمیایی مضری به نام دیوکسین می شود. این محصولات جانبی با مشکلات جدی سلامتی، از جمله خطرات سلامت باروری و رشد مرتبط هستند. نوشیدن، بلعیدن تصادفی یا شنا در آب تحت تأثیر شکوفه مضر جلبک می تواند باعث مشکلات جدی سلامتی از جمله بثورات پوستی، بیماری معده یا کبد، مشکلات تنفسی و اثرات عصبی شود [۴۰].

- راهکارهایی کنترل فرایند اوتروفیکاسیون

از آنجایی که اوتروفیکاسیون بخش بزرگی از بدنه های آبی را در سراسر جهان تحت تاثیر قرار می‌دهد، مهم است که این فرآیند باید کنترل شود. از آنجایی که فعالیت‌های انسانی علل اصلی غنی‌سازی مواد مغذی و اوتروفیکاسیون هستند، پرداختن به چنین مسائلی مهم است. برخی از راهکارها یا

[1] Blue baby syndrome
[1] Methemoglobinemia

اقدامات کنترلی برای به حداقل رساندن اثرات اوتروفیکاسیون عبارتند از:

- کنترل بیولوژیکی

فسفر یکی از عناصر مهمی است که منجر به ایجاد فرآیند اوتروفیکاسیون می‌شود. بنابراین، حذف فسفر از منابع مختلف مهم و ضروری است. یکی از ابزارهای حذف طبیعی فسفر از طریق پری‌فیتون‌ها است. این میکروب‌ها با جذب و رسوب فسفر و با فیلتر کردن فسفر از آب در حذف فسفر نقش دارند. روش‌های مختلف گیاه پالایی نیز برای کاهش موثر سمیت آب پیشنهاد شده است. ماکروفیت‌ها یا گیاهان آبزی[۱۴] مانند سنبل آبی[۱۵] و سرخس آبزی[۱۶] غلظت ترکیبات نیتروژن و فسفر را در آب کاهش می‌دهند. علاوه بر این، گیاه عدس آبی[۱۷] نیز برای تصفیه فاضلاب استفاده می‌شود، زیرا علاوه بر تصفیه و حذف پساب‌های مزرعه میگو، مقادیر زیادی آمونیاک را نیز از آب حذف می‌کند [۳۷].

- کاهش کوددهی بیش از حد

کودها یکی از منابع مهم مواد مغذی هستند که باعث اوتروفیکاسیون می‌شوند، بنابراین کاهش مصرف کودها می‌تواند راهبرد خوبی برای کاهش ورودی عناصر مغذی به منابع آبی باشد. استفاده بهینه از کود همچنین مستلزم آزمایش منظم خاک برای اطمینان از مصرف بهینه از کود است. همچنین می‌توان از یک منبع جایگزین کودها که توانایی تامین فسفر را به شکل رهایش تدریجی[۱۸] داشته باشد نیز استفاده کرد. در خاک‌هایی با محتوای فسفر بالا می‌توان از سایر مواد شیمیایی همانند پتاسیم و گوگرد برای دستیابی به بیش‌ترین تولید استفاده کرد [۳۷]. در تلاش برای رسیدگی به این پدیده، کمپوست‌سازی می‌تواند به عنوان یک راه حل جایگزین استفاده شود. در کود کمپوست، تمام عناصر ضروری توسط گیاهان شکسته و سنتز می‌شوند و در نتیجه چرخه‌ی اوتروفیکاسیون ایجاد نمی‌شود. این روش برای کنترل اوتروفیکاسیون به عنوان محدودیت مواد مغذی نامیده می شود [۳۵].

- آگاهی عمومی و قانونگذاری

آگاهی عمومی توانایی مردم در درک دنیای اطراف، حساسیت به محیط در حال تغییر و درک رابطه علت و معلولی بین محیط و رفتار انسان را تعیین می‌کند. آگاهی عمومی می‌تواند استفاده از کودهای آلی و تصفیه فاضلاب را قبل از رهاسازی در منابع آبی امکان‌پذیر کند. علاوه بر این، سازمان‌های مختلف می‌توانند قوانین مهمی را به منظور کاهش میزان اتروفیکاسیون ارائه کنند. برخی از این دستورات قانونی شامل مواردی است که از سوی اتحادیه اروپا صادر شده است و هدف آن حفاظت از کیفیت آب های زیرزمینی و سطحی و کاهش اثرات نامطلوب تخلیه فاضلاب شهری است [۳۷]. تقویت قوانین و مقررات در برابر آلودگی منابع غیرنقطه‌ای آب می‌تواند به طور قابل ملاحظه ای اتروفیکاسیون را کنترل کند. طبق گزارش EPA، آلودگی غیر نقطه‌ای جدی ترین چالش در مدیریت ورود مواد مغذی به سیستم های آبی است. بنابراین، کنترل منابع غذایی منجر به کاهش اوتروفیکاسیون می‌شود. با به حداقل رساندن آلودگی غیر نقطه‌ای، اساساً میزان مواد مغذی ورودی به اکوسیستم‌های آبی کاهش می‌یابد. هدف قوانین باید ارتقای استانداردهای کیفیت بالای آب و سیاست تسامح صفر[۱۹] و اجرای دقیق قانون نسبت به راه حل‌های غیر نقطه‌ای باشد. با حمایت سیاستگذاران، شهروندان، مقامات تنظیم کننده آلودگی و دولت، کنترل فرسایش به راحتی امکان پذیر است [۳۵].

- تابش اولتراسونیک

جهان پیوسته به دنبال روش‌های پیشرفته برای حل برخی از مشکلات زیست محیطی است. هنگامی که صحبت از اوتروفیکاسیون به میان می‌آید، استفاده از تابش فرا صوت

[1] Zero tolerance

[4] [19] Aquatic macrophytes
[5] [1] Eichhornia crassipes
[6] [1] Salvinia auriculata
[7] [1] Duckweed
[8] [1] Slow-release

یکی از این مکانیسم‌ها است که به عنوان یک راه حل جایگزین برای کنترل و مدیریت شکوفایی جلبک مورد استفاده قرار گرفته است. عملکرد این فرآیند، ایجاد حفره هایی است که رادیکال‌های آزاد تولید می‌کنند و این رادیکال‌ها سلول‌های جلبک را از بین می‌برند. تحقیقات هنوز برای تعیین منحصر به فرد بودن استفاده از آن در کنترل مشکل اوتروفیکاسیون در حال انجام است [۳۵].

- پیشگیری و معکوس کردن فرایند اتروفیکاسیون

اوتروفیکاسیون نه تنها برای اکوسیستم‌های بیوسفر (آبی و خشکی)، بلکه برای انسان‌ها نیز تأثیر دارد. کاهش ورودی مواد مغذی یک پیش شرط کلیدی برای احیاء است، اما دو نکته وجود دارد: اول اینکه ممکن است زمان زیادی طول بکشد، به خصوص به دلیل ذخیره مواد مغذی در رسوبات. ثانیا، بازسازی ممکن است به بیش از یک معکوس کردن ساده ورودی‌ها نیاز داشته باشد زیرا گاهی اوقات چندین حالت اکولوژیکی پایدار اما بسیار متفاوت وجود دارد. بازیابی دریاچه‌های اوتروفیک آهسته است و اغلب به چندین دهه نیاز دارد [۴۱].

راه حل‌های نوآورانه ای برای مقابله با آلودگی مواد مغذی در سیستم‌های آبی با تغییر یا تقویت فرآیندهای طبیعی برای تغییر اثرات مواد مغذی از اثرات مخرب اکولوژیکی تصور شده است. اصلاح مواد مغذی نوعی اصلاح محیطی است، اما فقط به مواد مغذی فعال بیولوژیکی مانند نیتروژن و فسفر مربوط می‌شود. در اصلاح زیست محیطی، فناوری های حذف مواد مغذی شامل فیلتراسیون بیولوژیکی است که از مواد زنده برای جذب و تجزیه بیولوژیکی آلاینده ها استفاده می‌کند. به عنوان مثال می‌توان به کمربند سبز، مناطق ساحلی، طبیعی وتلندهای طبیعی و ساخته شده و برکه‌های تصفیه فاضلاب اشاره کرد. این مناطق معمولاً تخلیه‌های انسانی مانند فاضلاب، رواناب سطحی یا تصفیه فاضلاب را برای احیای زمین پس از استخراج معادن، فعالیت‌های پالایشگاهی یا توسعه زمین جذب می‌کنند [۴۲]. استخراج بیولوژیکی مواد مغذی، زیست پالایی است که شامل گیاهان و حیوانات کشت شده است. استخراج زیستی مواد مغذی یا برداشت زیستی عملی است برای پرورش و برداشت صدف دریایی و جلبک دریایی به منظور حذف نیتروژن و سایر مواد مغذی از آب های طبیعی [۴۳].

احیای صدف در مصب‌ها:[۲] یک راه حل پیشنهادی برای پیشگیری و معکوس کردن اوتروفیکاسیون در مصب‌ها، احیای جمعیت صدف‌ها مانند صدف‌های دو کفه‌ای[۲۱] و خوراکی[۲۲] است. صخره‌های صدفی به حذف نیتروژن از ستون آب و فیلتر کردن مواد جامد معلق کمک می‌کند. بنابراین، متعاقباً احتمال یا میزان شکوفه‌های جلبکی مضر یا شرایط آنوکسیک کاهش می دهند [۴۴]. فعالیت تغذیه فیلتر با کنترل تراکم فیتوپلانکتون ها و جداسازی مواد مغذی برای کیفیت آب مفید در نظر گرفته می شود، که می تواند از طریق برداشت صدف از سیستم حذف شود، در رسوبات دفن شود، یا از طریق نیترات زدایی از بین برود [۴۵-۴۶].

پرورش جلبک دریایی: به سازگاری با تغییرات آب و هوایی جهانی کمک می‌کند [۴۷]. جلبک دریایی نیز مانند کلپ، فسفر و نیتروژن را جذب می کند. بنابراین برای رهایی از مواد مغذی بیش از حد از قسمت های آلوده اقیانوس مفید است [۴۸]. برخی از جلبک‌های دریایی کشت شده، بهره‌وری بسیار بالایی دارند و مقادیر زیادی N، P و CO_2 را جذب می‌کنند و مقدار زیادی O_2 تولید می‌کنند که تأثیر فوق‌العاده‌ای در کاهش اوتروفیکاسیون دارند [۴۹].

به حداقل رساندن آلودگی غیر نقطه‌ای: آلودگی غیر نقطه‌ای مشکل‌ترین منبع مواد مغذی برای مدیریت است. اقدامات زیر برای کاهش مقدار آلودگی که از منابع مبهم وارد اکوسیستم‌های آبی می‌شود توصیه می‌شود [۲۷]:

- مناطق حائل ساحلی: مطالعات نشان می‌دهد که رهگیری آلودگی غیر نقطه‌ای بین منبع و در نتیجه آب ممکن است

1
2

2 Estuaries
2 Mussels
2 Oysters

وسیله‌ای موفق برای پیشگیری باشد. مناطق حائل ساحلی رابطی بین یک بدنه آب و خشکی جاری هستند و در نزدیکی آبراه‌ها به منظور فیلتر کردن آلاینده‌ها ایجاد می‌شوند..

- سیاست‌های پیشگیری: سیاست‌ها و قوانین جدید برای تنظیم تخلیه و تصفیه فاضلاب منجر به کاهش بالقوه مواد مغذی در اکوسیستم‌های اطراف شده است. اما به طور کلی توافق شده است که سیاستی برای تنظیم استفاده کشاورزی از کود همراه با فضولات حیوانی باید اعمال شود.

- کشاورزی ارگانیک: کشاورزی ارگانیک در مقایسه با مزارع کوددهی معمولی به طور قابل توجهی میزان انتقال نیترات را به منابع آبی کاهش می‌دهد.

ژئومهندسی در دریاچه‌ها (حذف شیمیایی فسفر): ژئومهندسی (مهندسی زمین) به معنی دستکاری فرآیندهای بیوژئوشیمیایی معمولاً چرخه فسفر، برای دستیابی به پاسخ اکولوژیکی مطلوب در اکوسیستم است [۵۰]. تکنیک‌های مهندسی زمین معمولاً از موادی استفاده می‌کنند که قادر به غیرفعال کردن شیمیایی فسفر موجود برای ارگانیسم‌ها (به عنوان مثال فسفات) در ستون آب و همچنین مسدود کردن آزاد شدن فسفات از رسوبات (بارگیری داخلی) هستند [۵۱]. فسفات یکی از عوامل اصلی کمک کننده به رشد جلبک ها، عمدتا سیانوباکتری‌ها است، بنابراین هنگامی که فسفات کاهش یابد، جلبک قادر به رشد بیش از حد نخواهد بود [۵۲]. بنابراین، مواد ژئو مهندسی برای تسریع بازیابی توده‌های آبی اوتروفیک و مدیریت شکوفه جلبکی استفاده می‌شود [۵۳]. از نمک‌های فلزی (مانند آلوم، سولفات آلومینیوم)، مواد معدنی، رس‌های طبیعی و خاک های محلی، محصولات زائد صنعتی، رس‌های اصلاح شده (مانند بنتونیت اصلاح شده با لانتانیم) و غیره به عنوان جاذب فسفات استفاده می‌شود [۵۴-۵۵]. جاذب فسفات معمولاً در سطح بدنه آبی استفاده می شود و در کف دریاچه فرو می‌رود و فسفات احیا می کند، چنین جاذب‌هایی در سرتاسر جهان برای مدیریت اتروفیکاسیون و شکوفه جلبکی استفاده شده است [۵۶-۵۷]. یکی از روش‌های اصلاح اوتروفیکاسیون، حذف شیمیایی فسفر با استفاده از سولفات آلومینیوم است، نمکی که معمولاً در فرآیند انعقاد تصفیه آب آشامیدنی استفاده می‌شود. سولفات آلومینیوم یا همان طور که معمولاً به آن "زاج" گفته می‌شود، برای کاهش بار فسفر استفاده می‌شود و نتایج بیانگر اثربخشی خوب آلوم در کنترل فسفر در دریاچه های کم عمق بوده است [۵۸].

نتیجه‌گیری

با توجه به گستردگی وسیع کاهش کیفیت آب مرتبط با غنی‌سازی مواد مغذی، اوتروفیکاسیون تهدیدی جدی برای منابع آب آشامیدنی، شیلات و آب‌های تفریحی محسوب می‌شود. علیرغم بهبود چشمگیر کیفیت آب در نتیجه تلاش‌های گسترده برای کاهش غنی‌سازی مواد مغذی از قبیل قوانین آب پاک و آب آشامیدنی سالم، اوتروفیکاسیون و شکوفه‌های سیانوباکتری هنوز در آب‌های سطحی در سراسر جهان رایج هستند و علت اصلی آلودگی آب برای بسیاری از آب‌های شیرین هستند. تغییرات اقلیمی پیش‌بینی‌شده و رشد جمعیت انسانی این پتانسیل را دارد که کیفیت و کمیت آب را بیش‌تر کاهش دهد و مدیران منابع آب نیاز فوری به درک چگونگی به حداقل رساندن شدت و فراوانی شکوفه‌های جلبکی و سیانوباکتری دارند. با توجه به اینکه انتظار می‌رود تقاضا برای منابع آب شیرین به‌طور چشمگیری افزایش یابد، حفاظت از منابع آب در حال کاهش به یکی از مبرم‌ترین مسائل زیست‌محیطی تبدیل شده است. در بیشتر دریاچه‌ها و مخازن، فسفر عامل کنترل کننده درجه اوتروفیکاسیون است، اگرچه نیتروژن یا کربن نیز ممکن است به مواد مغذی محدودکننده تبدیل شوند، اکثر اقدامات کنترلی اتروفیکاسیون به سمت کاهش فسفر هدایت می‌شوند، زیرا در اکثر موارد می‌توان به غلظت‌های محدود کننده این عنصر دست یافت. بهر حال کنترل و مدیریت اتروفیکاسیون یک موضوع پیچیده است و به تلاش جمعی دانشمندان، سیاستگذاران و شهروندان برای کاهش ورودی‌های مواد مغذی، توسعه تکنیک‌های موثر و بلندمدت دستکاری زیستی و در نهایت احیای جوامع آبزی نیاز دارد.

منابع

[1] Harper, D. and Harper, D., 1992, What is eutrophication? Eutrophication of Freshwaters: Principles, problems and restoration: p. 1-28.

[2] Carpenter, S.R., 2005, Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005. 102(29): p. 10002-10005.

[3] Darby, F.A. and Turner, R.E., 2008, Effects of eutrophication on salt marsh root and rhizome biomass accumulation. Marine Ecology Progress Series, 2008. 363: p. 63-70.

[4] Carpenter, S.R., 2020, et al., Stochastic dynamics of Cyanobacteria in long-term high-frequency observations of a eutrophic lake. Limnology and Oceanography Letters, 5(5): p. 331-336.

[5] Scheffer, M. and Carpenter, S.R., 2003, Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. Trends in ecology & evolution,. 18(12): p. 648-656.

[6] Jørgensen, S.E., N.-B. Chang, and F.-L. Xu., Ecological modelling and engineering of lakes and wetlands. 2014: Elsevier.

[7] Gunderson, L., 2010, Ecological and human community resilience in response to natural disasters Ecology and society,. 15(2).

[8] Britannica, T., 2020, Editors of *encyclopaedia.* Argon. Encyclopedia Britannica.

[9] Hupfer, M. and Hilt, S., 2008, Lake Restoration. Encyclopedia of Ecology., Amsterdam: Elsevier.

[10] Ahuja, S., 2014, et al., Comprehensive water quality and purification. Vol. 1: Elsevier Amsterdam.

[11] Nixon, S.W., 1995, Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. Ophelia,. 41(1): p. 199-219.

[12] Taylor, D., 1995, et al., Nutrient limitation and the eutrophication of coastal lagoons. Marine Ecology Progress Series,. 127: p. 235-244.

[13] Levin, S.A., Encyclopedia of Biodiversity. 2013: Elsevier Science.

[14] Soetaert, K. and J.J. Middelburg. Modeling eutrophication and oligotrophication of shallow-water marine systems: the importance of sediments under stratified and well-mixed conditions. in Eutrophication in Coastal Ecosystems: Towards better understanding and management strategies Selected Papers from the Second International Symposium on Research and Management of Eutrophication in Coastal Ecosystems, 20–23 June 2006, Nyborg, Denmark. 2009. Springer.

[15] Shahnoushi, N., 2020, et al., Economic analysis of saffron production, in Saffron., Elsevier. p. 337-356.

[16] Schindler, D.W., 2006, Recent advances in the understanding and management of eutrophication. Limnology and oceanography,. 51(1part2): p. 356-363.

[17] Burkholder, J.M. and Glibert, P.M., 2022, Eutrophication and oligotrophication.

[18] Chislock, M.F., 2013, et al., Eutrophication: causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems. Nature Education Knowledge,. 4(4): p. 10.

[19] Aoki, I., 2012, Entropy principle for the development of complex biotic systems: organisms, ecosystems, the Earth.

[20] Cochran, J.K., H.J .Bokuniewicz, and Yager, P.L., 2019, Encyclopedia of ocean sciences.: Academic Press.

[21] Wetzel, R.G., 2001, Limnology: lake and river ecosystems. : gulf professional publishing.

[22] Gold, A. and J. Sims., 2005, Eutrophication. Encyclopedia of Soils in the Environment., Elsevier, Oxford.

[23] Kumar, P.S. and Prasannamedha, G., 2021, Biological and chemical impacts on marine biology. Modern Treatment Strategies for Marine Pollution,: p. 11-27.

[24] Chemistry, Eutrophication: Definition, Causes, Classification, Effects, 2022, https:// byjus.com /chemistry/ eutrophication.

[25] Rodhe, W., 1969, "Crystallization of eutrophication concepts in North Europe". In: Eutrophication, Causes, Consequences, Correctives. National Academy of Sciences, Washington D.C.

[26] Schindler, D., 1974, "Eutrophication and Recovery in Experimental Lakes: Implications for Lake Management". Science. 184 (4139) (4139): 897–99.

[27] Environmental Chemistry, What is Eutrophication: Definition, Mechanism, Effects and prevention, 2020, https://www.toppr.com/guides/environmental-chemistry / eutr op hication.

[28] Wetzel, R.G., 2001, Limnology: lake and river ecosystems. gulf professional publishing.

[29] Callisto, Marcos; Molozzi, Joseline and Barbosa, José Lucena Etham., 2014 "Eutrophication of Lakes" in A. A. Ansari, S. S. Gill (eds.), Eutrophication: Causes, Consequences and Control, Springer.

[30] Cultural eutrophication Archived 2015-05-04 at the Wayback Machine (2010) Encyclopedia Britannica.

[31] Smil, V., 2000, Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. Annual review of energy and the environment, 25(1), pp.53-88.

[32] Rabalais, N.N., 2002, Nitrogen in aquatic ecosystems. AMBIO: a Journal of the Human Environment, 31(2), pp.102-112.

[33] Qin, B., Yang, L., Chen, F., Zhu, G., Zhang, L. and Chen, Y., 2006, Mechanism and control of lake eutrophication. Chinese Science Bulletin, 51, pp.2401-2412.

[34] Khan, M.N. and Mohammad, F., 2014, Eutrophication: challenges and solutions. Eutrophication: Causes, Consequences and Control: Volume 2, pp.1-15.

[35] Conserve-energy-future; Causes, Effects and Solutions to Ecological Problem of Eutrophication, 2018, https://www.conserve-energy-future.com.

[36] Ansari, A.A., Singh, G.S., Lanza, G.R. and Rast, W. eds., 2010, Eutrophication: causes, consequences and control (Vol. 1). Springer Science & Business Media.

[37] The Biology Notes; Eutrophication- Definition, Causes, Types, Process, Examples, 2022, https://thebiologynotes.com

[38] van Beusekom, J.E.E., 2018, Eutrophication. In: Salomon, M., Markus, T. (eds) Handbook on Marine Environment Protection . Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60156-4_22.

[39] Glibert, P.M., Seitzinger, S., Heil, C.A., Burkholder, J.M., Parrow, M.W., Codispoti, L.A. and Kelly, V., 2005, Eutrophication. Oceanography, 18(2), p.198.

[40] US EPA, OW., 2013, "Nutrient Pollution ". www.epa.gov. Archived from the original on 2022-09-28. Retrieved 2022-02-15.

[41] May, L., Olszewska, J., Gunn, I.D.M., Meis, S. and Spears, B.M., 2020., July. Eutrophication and restoration in temperate lakes. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 535, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.

[42] Schindler, D.W., 2012, The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 279(1746), pp.4322-4333.

[43] Purohit, R., 2018, Eutrophication: Harmful Algal Blooms. International Journal Of Multidisciplinary Research In Science, Engineering and Technology (IJMRSET) 1 (2).

[44] Kroeger, T., 2012, Dollars and Sense: Economic benefits and impacts from two oyster reef restoration projects in the Northern Gulf of Mexico. The Nature Conservancy, 101.

[45] Burkholder, J.M. and Shumway, S.E., 2011, Bivalve shellfish aquaculture and eutrophication. Shellfish aquaculture and the environment, pp.155-215.

[46] Newell, R.I., Cornwell, J.C. and Owens, M.S., 2002, Influence of simulated bivalve biodeposition and microphytobenthos on sediment nitrogen dynamics: a laboratory study. Limnology and Oceanography, 47(5), pp.1367-1379.

[47] Duarte, C.M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A. and Krause-Jensen, D., 2017, Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation?. Frontiers in Marine Science, 4, p.100.

[48] Fan, W., Zhao, R., Yao, Z., Xiao, C., Pan, Y., Chen, Y., Jiao, N. and Zhang, Y., 2019, Nutrient removal from Chinese coastal

waters by large-scale seaweed aquaculture using artificial upwelling. Water, 11(9), p.1754.
[49]Duarte, C.M., 2009, Coastal eutrophication research: a new awareness. Hydrobiologia, 629(1), pp.263-269.
[50] Spears, B.M., Maberly, S.C., Pan, G., Mackay, E., Bruere, A., Corker, N., Douglas, G., Egemose, S., Hamilton, D., Hatton-Ellis, T. and Huser, B., 2014, Geo-engineering in lakes: a crisis of confidence? Environmental Science & Technology. 48 (17): 9977–9979.
[51] Mackay, E.B., Maberly, S.C., Pan, G., Reitzel, K., Bruere, A., Corker, N., Douglas, G., Egemose, S., Hamilton, D., Hatton-Ellis, T. and Huser, B., 2014, Geoengineering in lakes: welcome attraction or fatal distraction?. Inland Waters, 4(4), pp.349-356.
[52] Carpenter, S.R., 2008, Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105(32), pp.11039-11040.
[53] Spears, B.M., Dudley, B., Reitzel, K. and Rydin, E., 2013, Geo-Engineering in Lakes A Call for Consensus.
[54] Douglas, G.B., Hamilton, D.P., Robb, M.S., Pan, G., Spears, B.M. and Lurling, M., 2016, Guiding principles for the development and application of solid-phase phosphorus adsorbents for freshwater ecosystems. Aquatic ecology, 50, pp.385-405.
[55] Lürling, M., Mackay, E., Reitzel, K. and Spears, B.M., 2016, Editorial–A critical perspective on geo-engineering for eutrophication management in lakes. Water research, 97, pp.1-10.
[56] Epe, T.S., Finsterle, K. and Yasseri, S., 2017, Nine years of phosphorus management with lanthanum modified bentonite (Phoslock) in a eutrophic, shallow swimming lake in Germany. Lake and Reservoir Management, 33(2), pp.119-129.
[57] Nürnberg, G.K., 2017, Attempted management of cyanobacteria by Phoslock (lanthanum-modified clay) in Canadian lakes: water quality results and predictions. Lake and Reservoir Management, 33(2), pp.163-170.
[58] Huser, B.J., Egemose, S., Harper, H., Hupfer, M., Jensen, H., Pilgrim, K.M., Reitzel, K., Rydin, E. and Futter, M., 2016, Longevity and effectiveness of aluminum addition to reduce sediment phosphorus release and restore lake water quality. Water research, 97, pp.122-132.