رویکردهای کلی کنترل پدیده شکوفایی مضر جلبکی (HAB_s)

مریم معزی*[۱]، عیسی عبدالعلیان[۱] ، حجت اله فروغی فرد[۱] ، کیومرث روحانی قادیکلایی[۱] ، محمدرضا زاهدی[۱]

۱- پژوهشکده اکولوژی خلیج‌فارس و دریای عمان، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرعباس

Maryammoezzi1360@yahoo.com

چکیده

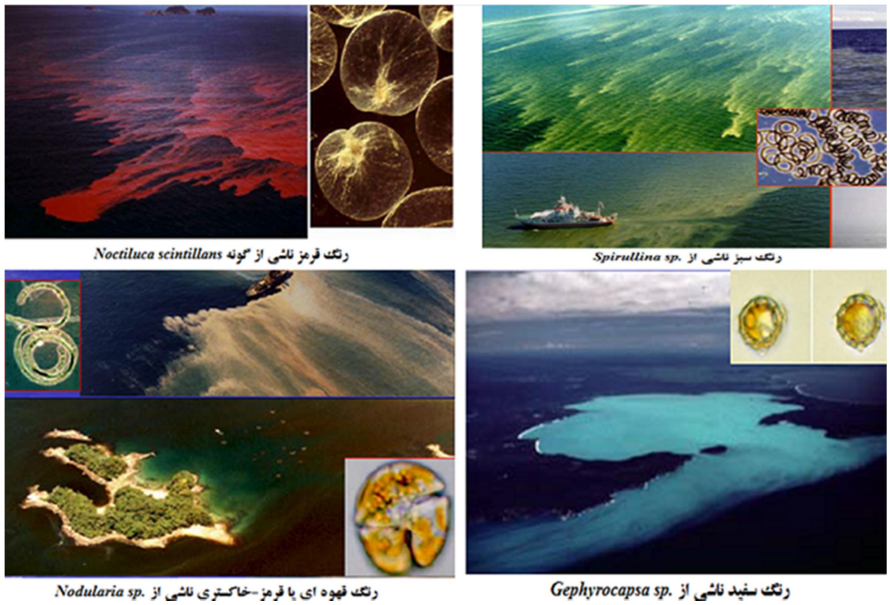
شکوفایی جلبکی مضر پدیده‌ای طبیعی است که ناشی از برخی گونه‌های پلانکتونی به‌ویژه دینوفلاژلاها می‌باشد و مشکلات زیادی را برای اکوسیستم‌های آبی ایجاد می‌نماید. باوجود طبیعی بودن این پدیده علاوه بر استرس‌های طبیعی، آلودگی‌های انسان‌ساز و ورود پساب‌ها و فاضلاب‌های شهری و صنعتی به اکوسیستم‌های آبی سبب پایداری و تشدید این پدیده در ده‌های اخیر شده است. مرگ‌ومیر آبزیان و خسارات قابل‌توجه وارده به محیط‌زیست آبی و صنعت آبزی‌پروری ناشی از این پدیده باعث شده است که محققین در پی راهکاری مناسب جهت کنترل این پدیده طبیعی برآیند سه روش جهت کنترل این پدیده تحت عنوان کنترل فیزیکی یا مکانیکی شامل استفاده از خاک رس و آلتراسونیک Ultrasonic، روش بیولوژیکی شامل استفاده از چراکننده‌ها، پاتوژن ها و اثر آنتاگونیسمی استفاده از ماکروجلبک‌ها جهت کاهش اثرات HAB و درنهایت کنترل شیمیایی، استفاده از ترکیبات شیمیایی یا معدنی برای حذف سلول‌های جلبکی مضر می‌باشد. بدین ترتیب تحقیقات مختلف توسط محققان متعددی انجام‌شده که می‌توان نتیجه گرفت هیچ‌یک از این فن‌های کنترل HAB به‌طور خاص بی‌تأثیر نیست اما جهت مرتفع ساختن این مشکل در محیط‌های محصور و کوچک می‌توان از آن‌ها با توجه به شرایط محیط و نوع گونه مشکل‌ساز استفاده کرد، که در این میان پیشنهاد می‌شود بهتر است از خاک رس به دلیل ایجاد اثرات کمتر زیست‌محیطی در محیط‌های دریایی و اثر متقابل بر موجودات دیگر پیکره آبی و هزینه پایین آن استفاده گردد.

واژه‌های کلیدی: آلتراسونیک، پاتوژن، دینوفلاژله، خاک رس، شکوفایی جلبکی مضر

مقدمه

بشر در عصر کنونی فشار و تنش بسیاری را بر زیستگاه‌های آبی وارد نموده است. ورود بسیاری از گونه‌های غیربومی و مهاجم در سطوح مختلف ریخت‌شناسی به محیط‌های جدید ازجمله تغییرات مهم انسانی است که بر زیست‌شناسی و بوم‌شناسی محیط‌های آبی تحمیل گردیده است (نصراله‌زاده ساروی، ۱۳۹۱). در آب‌های مناطق معتدله، حدود دید یا کدورت معمولاً وابسته به تراکم جلبک‌ها در آب است. با این‌حال در برخی موارد غیرمعمول، یک گونهٔ جلبکی می‌تواند به مقدار زیادی افزایش پیدا کند و به‌عنوان یک جامعهٔ میکروسکوپی گیاهی غالب شده و به تراکم‌های بالا برسد تا جایی که به واسطه رنگ‌دانه‌هایشان رنگ آب را تغییر دهد. این شکوفایی جلبکی اغلب تحت عنوان کشند قرمز بیان می‌گردد، اما امروزه ترجیح می‌دهند از اصطلاح شکوفایی جلبکی مضر (Harmful Algae Bloom (stress), HAB_s) از آن نام ببرند. این پدیده اگر به‌صورت موقت و ناپایدار و ناشی از گونه‌هایی باشد که سمیتی برای آنان ذکر نشده است چندان نگران‌کننده نیست ولی اگر به‌صورت پایدار درآید ممکن است خسارات جبران‌ناپذیری بر اکوسیستم آبی و آبزیان وارد نماید (Gobler *et al.,* 2008). تغییر رنگ آب ممکن به صورت‌های مختلف قرمز، زرد، نارنجی،

قهوه‌ای، سبز و ارغوانی دیده شود (شکل ۱) و حتی نیز گاهی بوی بدی به مشام برسد (Verlecar and Desai, 2004). شکوفایی مضر جلبکی خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی بسیاری را شامل می‌شود (Song *et al.*, 2010). خسارات اقتصادی این قبیل شکوفایی‌ها شامل خسارت به صیادی، آبزی‌پروری، گردشگری، نظارت و مراقبت‌های بهداشتی است که قابل‌توجه می‌باشد (شکل ۲). خسارات زیست‌محیطی نیز شامل کاهش اکسیژن، گرفتگی آبشش ماهیان، مسمومیت موجودات مختلف آبزی و نیز اثرات زیبایی‌شناختی منفی است (Granéli and Turner, 2006). شکوفایی ناشی از برخی از گونه‌های فیتوپلانکتونی به‌ویژه دینوفلاژلاها مشکلات زیادی را برای اکوسیستم‌های آبی و آبزی‌پروری ایجاد می‌نماید. برخی از این جلبک‌ها تولید سم می‌کنند (Beaulieu *et al.*, 2005) که علاوه بر تولید سموم، از طریق کاهش میزان اکسیژن محیط به‌ویژه هنگام تجزیه میکروبی هوازی، باعث افت شدید میزان اکسیژن محیط و مرگ‌ومیر آبزیان خواهد شد. کاهش اثرات شکوفایی ناشی از پدیده شکوفایی مضر جلبکی نیاز به بهبود آب‌های ساحلی از طریق تصفیه فاضلاب‌های شهری، آب‌های ورودی کشاورزی و همچنین کانال‌های خروجی مزارع پرورش آبزیان دارد و به دلیل اثرات شدیدی که شکوفایی مضر جلبکی بر روی اقتصاد و سلامت همگانی دارد تبدیل به عاملی جهت ارائه مدیریت مناسب برای کنترل و کاهش اثرات آن شده است (Beaulieu *et al.*, 2005). راهکارهای زیادی برای کنترل و کاهش اثرات شکوفایی این گروه از پلانکتون‌ها پیشنهادشده است. انواع روش‌های مبارزه با شکوفایی مضر پلانکتونی شامل: کنترل فیزیکی (Hasler and Jones, 1949)، کنترل بیولوژیک (Zheng *et al.*, 2005) و مورد دیگر روش شیمیایی با استفاده از مواد کنترل شیمیایی (Steidinger, 1975)، جهت کاهش اثرات HAB_s می‌باشد.



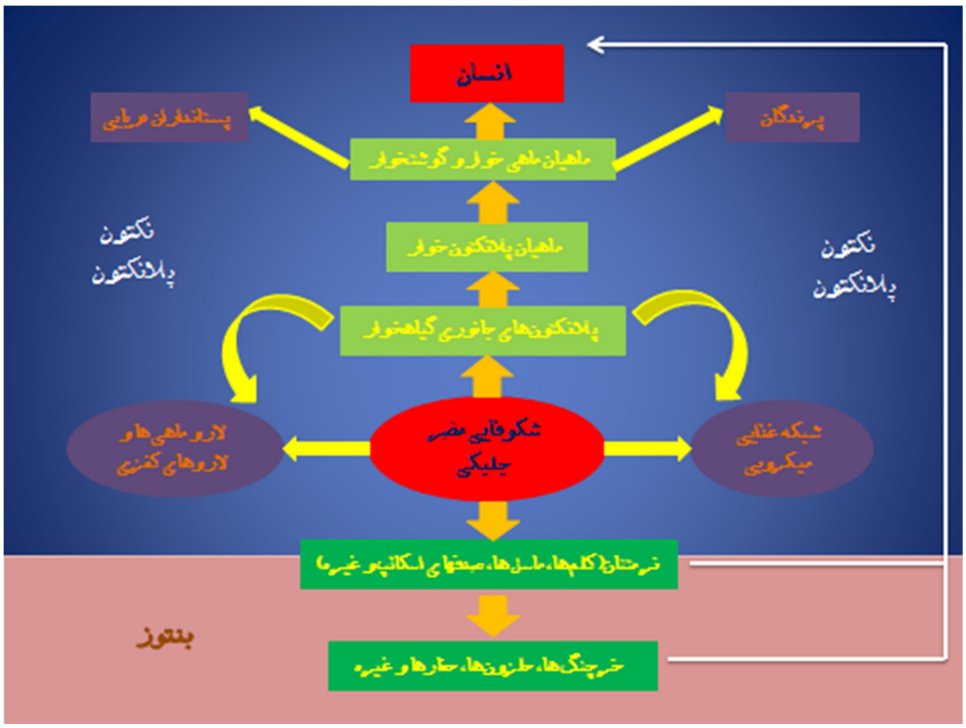
شکل ۱. انواعی از شکوفایی جلبکی مضر و رنگ ناشی از شکوفایی آن‌ها (Yasuwo, 2006)

شکل ۲. چند مورد از مرگ‌ومیر ناشی از شکوفایی مضر جلبکی (عکس از Yasuwo, 2006 و نگارنده)

شکوفایی مضر جلبکی

در گذشته دانشمندان بدون در نظر گرفتن تغییر رنگ آب این پدیده را کشند قرمز می‌نامیدند اما امروزه از اصطلاح شکوفایی جلبکی مضر (HAB_s) استفاده کنند. اصطلاح کشند قرمز به تولید مثل سریع پلانکتون‌ها گفته می‌شود که به‌طور فصلی و در فصول مختلف اتفاق می‌افتد و می‌تواند باعث خسارات جدی باشد. در اثر حضور رنگ‌دانه‌های موجود در این سلول‌های جلبکی رنگ آب تغییر می‌کند. این تغییر رنگ آب به‌صورت های مختلف قرمز، زرد، نارنجی، قهوه‌ای، سبز و ارغوانی دیده می‌شود، اما Landsberg (۲۰۱۰)، شکوفایی مضر جلبکی را ازدیاد تمام گونه‌های جلبکی آبزی تعریف می‌کند که یا سم تولید می‌کنند و یا به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم به موجودات آبزی و خشکی‌زی آسیب می‌رسانند. پدیده شکوفایی مضر جلبکی در اکثر مناطق جهان اتفاق افتاده است. در آب‌های ساحلی کره جنوبی (Jeong *et al.*, 2008)، ژاپن (Shen *et al.*, 2012)، چین (Zhou *et al.*, 2007)، اقیانوس هند، اطلس و آرام به‌ویژه در خلیج پورتوریکو (Matsuoka *et al.*, 2008)، ترکیه (Xu *et al.*, 2010)، ایران (معزی و همکاران، ۱۳۹۱) و سایر کشورها گزارش‌شده است. از حدود ۵۰۰۰ گونه شناخته‌شده فیتوپلانکتون فقط ۳۰۰ گونه از آن‌ها منجر به HAB می‌گردند که برای اکوسیستم‌های آبی به طرق مختلف زیان‌آور محسوب می‌شوند. فیتوپلانکتون‌ها بدون شک برای اکوسیستم‌های آبی نقش حیاتی دارند، زیرا بخش عظیمی از تغذیه پلانکتون‌های جانوری را شامل می‌شوند. پلانکتون‌های جانوری نیز به‌نوبه خود غذای اصلی ماهیان به شمار می‌روند (شکل ۳). جلبک‌های دریایی برای زندگی روی زمین بی‌نهایت مهم هستند. احتمالاً آن‌ها مهم‌ترین موجودات زنده بر روی سیاره ما هستند. آن‌ها حداقل در سه چیز ما را تحت تأثیر قرار می‌دهند. اول، به نظر می‌رسد که عامل مهمی در کنترل گاز کربن دی‌اکسید (CO_2) اتمسفر می‌باشد که به‌نوبه خود می‌تواند در حفظ گرمای زمین مؤثر باشد. دوم، فیتوپلانکتون‌ها و باکتری‌ها اساس شبکه‌های غذایی دریایی هستند. درنهایت و سوم اینکه ریزجلبک‌های دریایی به دلیل تولید انواع متنوعی از سموم دریایی مهم تلقی می‌شوند. فقط حدود ۸۰ گونه از این فیتوپلانکتون‌ها

سم تولید می‌کنند (Granéli and Turner, 2006). برخی از این ترکیبات، به آب‌های اطراف منتشر می‌شوند درحالی‌که سایر آن‌ها در فیتوپلانکتون‌ها باقی می‌مانند و به شبکه‌های غذایی واردشده و در ماهی‌ها و صدف‌ها تجمع می‌یابند. در اکثر موارد به نظر نمی‌رسد که با این ترکیبات قوی تحت تأثیر قرار بگیرند، اما موجودات رده‌های بالاتر شبکه‌های غذایی مثل پستانداران دریایی و انسان‌ها ممکن است دچار بیماری شده و یا حتی بمیرند. در اکثر موارد سموم تولیدشده توسط فیتوپلانکتون‌های دریایی تنها از طریق تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی قابل‌شناسایی هستند (Verlecar and Desai, 2004). شکوفایی‌های مضر جلبکی می‌تواند ناشی از داینوفلاژله‌ها، دیاتومه‌ها و سیانوباکتری‌ها باشد (شکل ۴)(Landsberg, 2010).

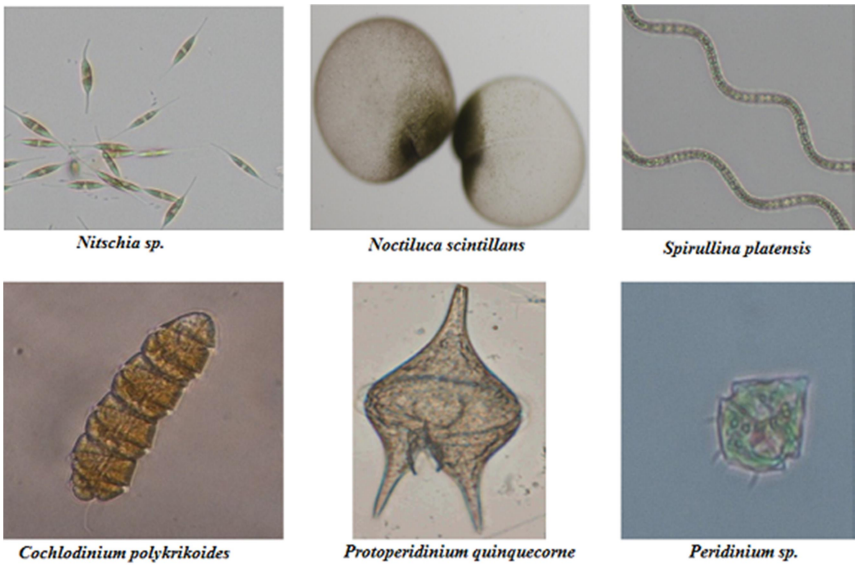


شکل ۳. اثرات شکوفایی مضر جلبکی (HAB) بر چرخه غذایی دریا و انسان (Matsuoka, 2008)

انواع روش‌های کنترل شکوفایی مضر پلانکتونی

تلاش‌های انسان برای کنترل حشرات، بیماری‌ها، قارچ‌ها، استرس‌ها، آلودگی‌ها و پدیده کشند در اکوسیستم‌های آبی از فعالیت‌های متداول در زمین است. ازآنجایی‌که از گذشته تا به امروز بخش زیادی از پروتئین غذای انسانی از طریق منابع آبی تأمین می‌شود و با توجه به اثراتی که این پدیده می‌تواند بر منابع غذایی دریایی و همچنین بحث آبزی‌پروری و شیلاتی و حتی گردشگری داشته باشد محققان به دنبال روش‌های متفاوتی برای کنترل این پدیده و همچنین مهار آن هستند. افزایش میزان این پدیده طبیعی در محیط‌های آبی سبب کاهش اقتصادی صید و صیادی، آبزی‌پروری، تأثیر بر سلامت انسان و اثرات زیست‌محیطی می‌شود (Anderson, 2004). درصورتی‌که فاضلاب‌های مواد مغذی به‌درستی مدیریت نشوند می‌تواند میزان HAB را افزایش دهد. استفاده انسان از منابع بر وقوع و تداوم HAB تأثیر می‌گذارد. فعالیت‌های انسانی می‌تواند از طریق تغییر در الگوهای استفاده از

منابع زمینی و یا تغییرات هیدرولوژی منطقه با ورود مواد مغذی وقوع HAB را تسهیل و افزایش دهد. مرگ‌ومیر ماهیان و به‌ویژه ماهیان استخوانی و نرم‌تنان پرورشی که ناشی از HAB باشد.



شکل ۴. چند نمونه از گونه‌های HAB موجود در منطقه خلیج‌فارس و دریای عمان (عکس از نگارنده)

محدودیت بزرگی را برای توسعه آبزی‌پروری و جانوران دریایی در معرض خطر ایجاد می‌نماید. سلول‌ها و یا کیست‌های مقاوم گونه‌های HAB می‌توانند به مناطق جدیدی از آب و در بسترهای ماسه‌ای منتقل و یا سموم ناشی از برخی از گونه‌ها در بدن نرم‌تنان زنده دریایی که ممکن است باعث تهدید رشد و سلامت انسان و محیط‌زیست شود انتقال پیدا کنند. بدون تردید HAB در مهروموم‌های بعدی به دلیل اینکه سیست آن در بستر به‌طور فراوان موجود بوده و با فراهم شدن شرایط مساعد دوباره شکوفا می‌شود و مجدداً به وقوع خواهد پیوست به همین دلیل تحقیقات گسترده‌ای را برای مدیریت و کنترل آن می‌طلبد، بنابراین مدیران منابع طبیعی، مقامات عالی‌رتبه و مردم باید علل و تأثیرات HAB را بدانند که خود مبنایی جهت پیشگیری یا به حداقل رساندن اثرات نامطلوب آن‌ها بر اقتصاد، بهداشت عمومی و سیستم‌های دریایی است. هیچ قانون عمومی وجود ندارد که تراکم سلول‌های جلبکی مضر را در این پدیده دقیقاً مشخص کرد به‌عنوان مثال در تراکم پایین کمتر از ۱۰۰۰ cell/L گونه *Alexandrium tamarense* بدون تغییر رنگ آب در نرم‌تنان سم PSP تولید می‌نماید و این در حالی است که گونه *Gyrodinium aureolum* با تراکم بالاتر از ۱۰،۰۰۰،۰۰۰ cell/L باعث تغییر رنگ آب شده و سبب مرگ ماهیان و موجودات بنتیکی می‌گردد (جدول ۱). گونه *Cochlodinium polykrikoides* به‌وسیله تولید حجم زیادی از ماده لزج و موکوس مانند و کاهش اکسیژن باعث مرگ‌ومیر ماهیان و نرم‌تنان صدف دار می‌گردد.

جدول ۱. تراکم سلولی برخی گونه‌های HAB مسبب ایجاد شکوفایی و مرگ‌ومیر (Koji *et al.*, 1998 و Choi *et al.*, 1998)

گونه جلبکی	تراکم سلولی سبب کشند (cells L^{-1})
Dinophysis acuminate (داینوفلاژله)	۵۰۰
Dinophysis norvegica(داینوفلاژله)	۱۰۰۰
Alexandrium tamarense(داینوفلاژله)	۵۰۰
Pseudonitzschia seriata(دیاتومه)	۲۰۰۰،۰۰۰
Pseudonitzschia delicatissima(دیاتومه)	۵۰۰۰،۰۰۰
Prorocentrum lima(داینوفلاژله)	۵۰۰

دانشمندان زیادی به‌منظور کاهش خسارات وارده به ماهیگیران و پرورش‌دهندگان مطالعات فیزیولوژیکی و اکولوژیکی انجام داده‌اند. رویکردهای مستقیم مداخله در شکوفایی می‌تواند به سه دسته تقسیم شود: کنترل مکانیکی یا فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی. این تکنیک‌ها به شرح ذیل می‌باشند:

۱) کنترل فیزیکی

کنترل فیزیکی یا مکانیکی شامل استفاده از فیلترها، پمپ‌ها و موانع (مثل توری‌ها) برای حذف یا مانع‌شدن از ورود سلول‌های HAB استفاده می‌شود. در روش فیزیکی دو روش دیگر نیز وجود دارد. روش استفاده از خاک رس به‌عنوان یک روش کارآمد برای کنترل شکوفایی پلانکتونی و روشی دیگر آلتراسونیک Ultrasonic به معنای مافوق صوت است که با توجه به محدوده فرکانس شنوایی انسان ۱۰ تا ۲۰ هرتز، محدوده فرکانسی امواج مافوق صوت ۴۰ کیلوهرتز تا چندین مگاهرتز می‌باشد.

روش اول به‌عنوان یکی از روش‌های کارآمد جهت برطرف ساختن شکوفایی پلانکتونی می‌باشد در این روش استفاده از خاک رس به دلیل کارایی بالا در از بین بردن داینوفلاژله‌ها به‌عنوان مطمئن‌ترین و مؤثرترین روش کنترل شکوفایی جلبکی داینوفلاژلا معرفی شده است و خاک رس ارزان، فراوان و به‌آسانی در دسترس می‌باشد (Beaulieu *et al.*, 2005). استفاده از خاک رس به دلیل چسبیدن به سلول‌ها باعث سنگین شدن آن‌ها و پایین کشیدن سلول‌ها به کف بستر و رسوب آن‌ها می‌گردد که استفاده از ماده PAC باعث افزایش این چسبندگی و کاهش بیشتر سلول‌ها می‌شود. خاک رس منابع مختلفی دارد و حتی میزان رس آن‌ها متفاوت است بنابراین باید خاکی انتخاب شود که درصد رس مناسبی داشته باشد. با توجه به سازگاری آبزیان در ستون و بستر آب با مقادیر متنابهی از مواد معدنی موجود در خاک رس که از طریق رودخانه و محیط اطرافشان وارد محیط آب می‌شود دارای حداقل اثرات زیان‌آور بر موجودات آبزی و محیط‌زیست آن‌ها می‌باشد. مطالعات متعددی بر روی موجودات و جوامع بنتیک انجام‌شده که ثابت کرده است خاک رس اثرات اندکی بر روی آن‌ها داشته است. اثرات منفی پخش خاک رس آن‌قدر پراهمیت نیست که بر روی کیفیت آب و بستر تأثیری داشته باشد. همچنین هیچ اثر سمی مستقیمی بر روی آبزیان ندارد و در نهایت استفاده از خاک رس غلظت مواد سمی را در سوسپانسیون آب دریا با اثر بر روی سلول کاملاً کاهش می‌دهد (Secher, 2009). اگر قبل از خاک رس از منعقد کننده شیمیایی چون پلی آلومین کلراید استفاده شود این تأثیر را از طریق افزایش پل‌های ارتباطی روی سطح ذرات، سریع‌تر می‌سازد. همچنین مرگ سلول‌های جلبکی براثر تماس مستقیم با دانه‌های خاک رس به وجود می‌آید نه با آزادسازی مواد سیتوتکسین که توسط خاک رس رهاسازی می‌شود (Pierce *et al.*, 2004). کارایی خاک رس در رفع این پدیده

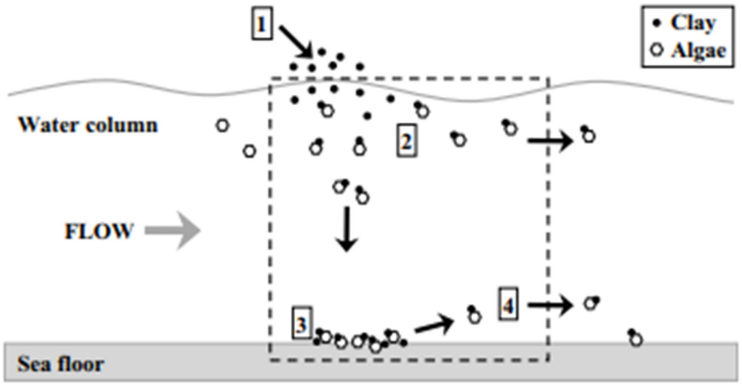
حدود ۸۰ درصد می‌باشد که آزمایش آن در محیط طبیعی با شرایط آزمایشگاهی اختلاف چندانی ندارد (Anderson, 2004). مطالعه‌ای دیگر کارایی بالای خاک رس در حذف و از بین بردن سلول‌های جلبکی را تا بیش از ۸۰ درصد و گاهی ۹۹-۹۵ درصد نشان داده است (معزی و همکاران، ۱۳۹۱). مطالعه دیگری که بر روی گونه داینوفلاژله بدون سم *C.polykrikoides* انجام شد از خاک رس با ماده PAC و هم بدون PAC استفاده شد و نتایج بررسی نشان داد که بعد از ۲، ۴،۶ و ۲۴ ساعت بعد از افزودن خاک و PAC بیشترین کاهش سلول جلبکی در تیمار استفاده توأم از خاک رس و ماده PAC در کمترین زمان بود (معزی و همکاران. ۱۳۹۱). مکانیسم اثر خاک رس بر روی سلول‌های جلبکی در طبیعت به‌صورت زیر می‌باشد (شکل ۵):

الف) اسپری نمودن خاک رس بر روی سطح آب

ب) چسبیدن خاک رس به سلول جلبکی

ج) رسوب مجموعه جلبک و خاک رس به کف بستر

د) به حالت معلق درآمدن مجموعه با افزایش جریان آب



شکل ۵. مکانیسم اثر خاک رس بر روی جلبک در محیط طبیعی (۱) اسپری نمودن خاک رس بر سطح آب (۲) چسبیدن خاک رس به سلول جلبکی (۳) رسوب مجموعه جلبک و خاک رس به کف (۴) به حالت معلق درآمدن مجموعه با افزایش جریان آب (Beaulieu, 2005)

آزمایش دوغاب خاک رس

بدین منظور ابتدا مقادیر مختلف از خاک رس (Choi *et al.*, 1998 ؛ معزی و همکاران، ۱۳۹۱) به‌صورت دوغاب تهیه می‌شود و به‌عنوان تیمار آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن که سلول‌های جلبکی در معرض دوغاب خاک رس قرار گرفتند تراکم جلبکی در زمان‌های مختلف (معزی و همکاران، ۱۳۹۱)، اندازه‌گیری می‌گردد. جهت حصول درصد کارایی حذف سلول جلبکی از فرمول زیر محاسبه می‌گردد (Padilla *et al.*, 2006) (شکل ۶).

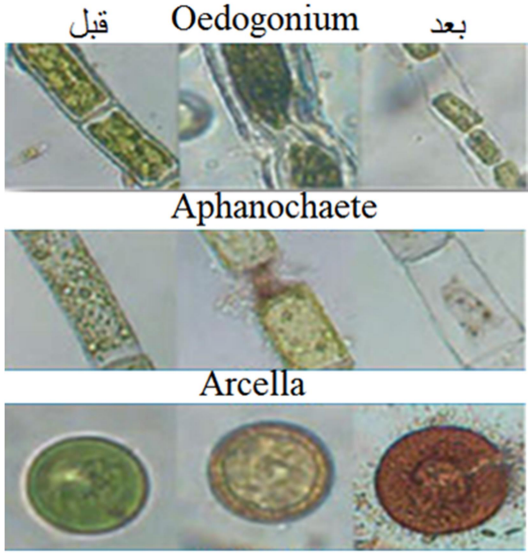
RE% =۱-(تراکم نهایی سلول‌ها در تیمار آزمایش / تراکم نهایی سلول‌ها در تیمار کنترل) ×۱۰۰

شکل ۶. مراحل انجام آزمایش دوغاب خاک رس و روند از بین رفتن سلول جلبکی مضر (عکس از نگارنده)

مکانیسم اثر روش Sonic Solutions

امواج آلتراسونیک امواج صوتی هستند که خارج از محدوده شنوایی انسان و معمولاً در فرکانس بیشتر از ۲۰۰۰۰ هرتز (۲۰ کیلوهرتز) هستند. اثرات امواج آلتراسونیک بر روی سلول‌ها می‌تواند به دو دسته حرارتی و مکانیکی تقسیم شود، هرچند هر دو نوع اثرات می‌توانند به‌طور هم‌زمان رخ دهند. اثرات حرارتی به دلیل افزایش انرژی از امواج مافوق صوت به افزایش دمای سلول منجر می‌شود، درحالی‌که اثرات مکانیکی می‌توانند از بعد ظاهر و شدت متفاوت باشد. استفاده از امواج آلتراسونیک برای کنترل جلبک، بر اثرات مکانیکی امواج صوتی روی سلول‌های جلبکی تأثیر می‌گذارد. لرزش‌های ناشی از امواج صوتی باعث ایجاد واکنش‌های گازی در سلول‌ها می‌شود. حباب‌ها در داخل سلول‌ها در یک فرایند به نام حفره سازی یا حباب سازی تشکیل، گسترش و قرار می‌گیرند. امواج مافوق صوت درنهایت حباب‌ها را تخریب می‌کند و به سلول‌ها آسیب می‌رساند. درجه حباب سازی و درنتیجه اثر روی سلول با فرکانس، شدت و مدت امواج صوتی تنظیم می‌شود (Rajasekhar *et al.*, 2012). تولید رادیکال‌های آزاد و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) در روش آلتراسونیکی در آب ممکن است نقش مهمی در اثرات این روش داشته باشد. Joyce و همکاران (۲۰۱۰)، اشاره کردند که در ۳۰ آزمایش غیرمستقیم فرکانس‌ها و قدرت‌های مختلف آلتراسونیک، فرکانس‌های بالاتر (۸۶۴ کیلوهرتز)، رادیکال‌های آزاد بیشتری تولید می‌کنند که ممکن است در تشکیل پراکسید هیدروژن تأثیر داشته باشند در نتیجه اثر آن را در روش اولتراسوند جهت غیرفعال کردن جلبک افزایش می‌دهند. گرچه پراکسید هیدروژن یک محصول جانبی متابولیسم اکسیداتیو است که طبیعتاً اتفاق می‌افتد، مقدار زیادی از این ترکیب می‌تواند سلول‌ها را آسیب یا بکشد (Joyce *et al.*, 2010). Sonic Solutions به دو روش جلبک‌ها را کشته و کنترل می‌کند جلبک سبز-آبی: فرکانس هارمونیک Sonic Solutions با برخورد به وزیکول‌های گازی (واکوئل) داخل سلول جلبک سبز- آبی باعث پاره شدن آن‌ها می‌شود. این باعث می‌شود سلول‌های جلبکی به کف پیکره آبی سقوط کنند و با دور بودن از نور مستقیم خورشید، نمی‌تواند فتوسنتز انجام دهند و در اثر گرسنگی ضعیف شده و

از بین می‌روند. سپس باکتری‌های کف بستر آب از سلول‌های جلبک سبز- آبی تغذیه می‌کنند. دیگر جلبک‌ها: فرکانس هارمونیک Sonic Solutions به پیوند شیمیایی دیواره سلولی آن‌ها که به سیتوپلاسم متصل است برخورد می‌کند. هنگامی‌که این اتفاق می‌افتد سیتوپلاسم درون سلول دور از دیواره سلول قرار می‌گیرد. در این حالت سلول نمی‌تواند نه غذا و نه هرگونه مواد زائد مصرف کند. در طول این مدت سلول از گرسنگی می‌میرد. استفاده Soni Solutions برای زندگی دیگر آبزیان ازجمله ماهی‌ها، قورباغه‌ها، مارها، لاک‌پشت‌ها و حتی سمورهای آبی امن است. درواقع ابداع Sonic Solutions در تأسیسات پرورش ماهی و در حوضچه‌ها برای نجات ماهی از اثرات سمی جلبک استفاده می‌شود (شکل ۷).



شکل۷. سلول در قبل و بعد و زمان اثر روش Sonic Solutions

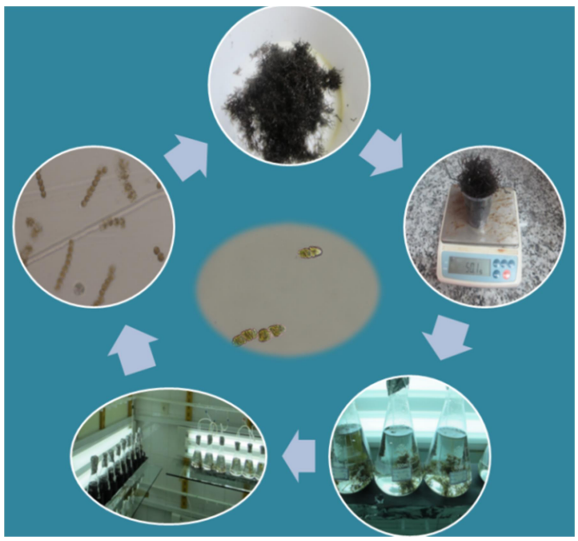
۲) کنترل بیولوژیکی

استفاده از عوامل بیولوژیک برای کاهش اثرات شکوفایی این گروه از فیتوپلانکتون‌ها از دیگر راهکارها می‌باشد (روحانی قادیکلایی و گرگیج جاسکی، ۱۳۹۵). کنترل بیولوژیکی شامل استفاده از ارگانیسم‌ها یا پاتوژن‌ها (مثلاً ویروس‌ها، باکتری‌ها، انگل‌ها، زئوپلانکتون‌ها و صدف‌ها) است که می‌تواند سلول‌های HAB را از بین ببرد یا می‌تواند آن‌ها را لیز کند. در آب‌های شیرین برای کنترل شکوفایی ناشی از جلبک‌های سبز – آبی از تغییر ساختار هرم غذایی به‌منظور افزایش تغذیه جلبک توسط چرندگان زئوپلانکتونی همچون کلادوسرها، لارو ماهیان، میکروزئوپلانکتون‌هایی چون روتیفر و مژکداران (Tillmann, 2004) و همچنین استفاده از ویروس‌ها و باکتری‌ها برای کاهش و کنترل شکوفایی داینوفلاژلاها می‌باشد (Brussaard, 2004). یکی دیگر از راهکارهای کنترل بیولوژیکی شکوفایی جلبکی مضر استفاده از جلبک‌های ماکروسکوپی می‌باشد (شکل ۸).

شکل ۸. مراحل مختلف عصاره گیری از جلبک ماکروسکوپی (عکس از نگارنده)

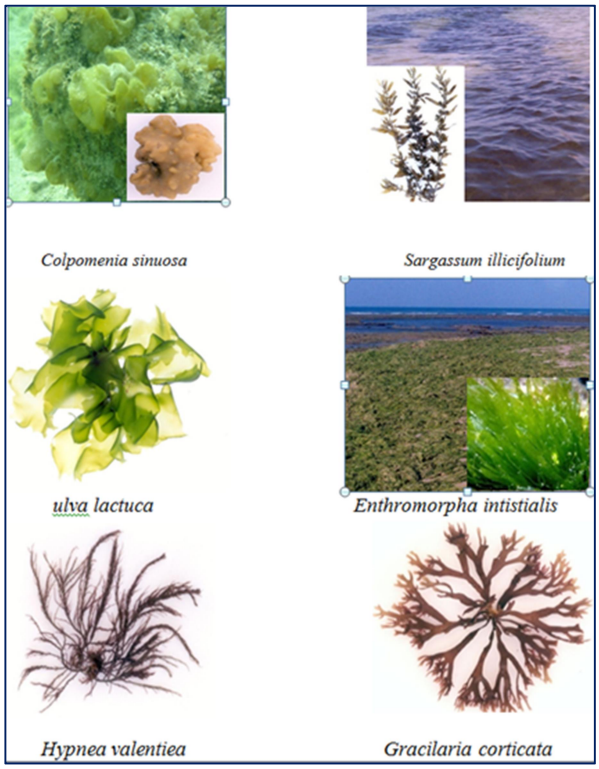
جلبک‌های دریایی می‌توانند به‌طور وسیعی پخش شوند و فراوانی گونه‌های آن‌ها به‌آسانی قابل‌شناسایی است و به‌عنوان یک پتانسیل منابع ضد جلبکی قیمت نسبتاً پایین و مناسبی دارند.

واکنش بین ماکروجلبک‌ها و ریزجلبک‌ها به‌صورت امن برای کنترل شکوفایی مضر جلبکی در نواحی ساحلی استفاده می‌شود. جلبک‌های ماکروسکوپی با داشتن رابطه آنتاگونیستی (ضد هم) هم در محیط‌های طبیعی و هم در محیط‌های آزمایشگاهی شناسایی‌شده‌اند (Hasler and Jones, 1949 ؛ معزی و همکاران، ۱۳۹۱)(شکل ۹).



شکل ۹. آزمایش مواجهه گونه جلبکی مضر با جلبک ماکروسکوپی در شرایط آزمایشگاهی (عکس از نگارنده)

تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته که نشان داده گیاهان ماکروفیت مواد شیمیایی تولید می‌کنند که از رشد برخی ریزجلبک‌های دیگر جلوگیری می‌کند (Sfriso and Pavoni, 1994). حتی بعضی از این مواد شناسایی و استخراج شده‌اند و به‌طور موفقیت‌آمیزی برای کنترل HAB خالص‌سازی شده‌اند (Jin *et al.*, 2005)؛ بنابراین از عصاره جلبک‌های دریایی، بافت تازه جلبک‌ها و نیز آب محیط کشت حاوی جلبک تازه برای فعالیت‌های ضد جلبکی نیز استفاده می‌شود و با بررسی دقیق‌تر آن‌ها می‌توان برای کنترل انتخابی گونه‌های جلبکی مضر از علف‌های دریایی (شکل ۱۰) و عصاره آن‌ها که اثرات ضد جلبکی دارند استفاده کرد (Jeong *et al.*, 2000 ؛ معزی و همکاران، ۱۳۹۱).



شکل ۱۰. چند گونه از جلبک‌های ماکروسکوپی بومی خلیج‌فارس و دریای عمان (قرنجیک و روحانی قادیکلایی، ۱۳۸۹)

۳) کنترل شیمیایی

کنترل شیمیایی شامل استفاده از ترکیبات شیمیایی یا معدنی برای کشتن، مهار و یا حذف سلول‌های HAB است. استفاده این روش برای کاهش شکوفایی داینوفلاژلاها مورد توجه زیادی قرار نگرفت به دلیل اینکه اثرات زیادی را بر روی سایر آبزیان دارد این روش بیشتر برای تمیز ساختن آب‌های آشامیدنی و سیستم‌های تصفیه آب شیرین تدارک دیده‌شده است این مواد می‌تواند شامل سولفات مس، اکسیدان‌های شیمیایی مانند کلرین، پراکسید هیدروژن، ازون و کلرامین باشد (Hosseini *et al.*, 2013). در

مطالعه‌ای که اثر پراکسید هیدروژن بر روی گونه *Gymnoidinum nagasakiense* مورد بررسی قرار گرفت این گونه پس از طی ۳۰ دقیقه با غلظت ۶-۴/۵ میلی‌گرم درلیتر از آن ماده متلاشی گردید. این روش می‌تواند اثرات کشندگی بر روی سایر جلبک‌ها و آبزیان داشته باشد. همچنین استفاده از موادی مانند سولفات مس ممکن است سلول را از بین نبرد ولی باعث ثابت ماندن و مردن سلول‌ها می‌گردد (معزی و همکاران، ۱۳۹۱) و برخی مواد مانند اکسیدان‌ها باعث لیز شدن سلول‌ها می‌شوند (Bibak and Hosseini, 2013)، بنابراین سعی در استفاده از این روش در کنترل مستقیم شکوفایی سلول‌های جلبکی مضر ممکن است اثرات و نتایج ناخواسته بدی را در محیط‌های طبیعی به دنبال داشته باشد (Chorus and Bartram, 1999). بنابراین تلاش برای کنترل نیز ممکن است در موقعیت‌های اضطراری که در آن گونه‌های در معرض خطر یا دیگر منابع با ارزش توسط یک HAB تهدید می‌شود و نیز زمانی که مزایای مداخلات سریع و مؤثر بیش از منافع احتمالی منفی محیط‌زیست باشد، توجیه می‌شود.

توصیه ترویجی

با توجه به اینکه روش‌های مختلف کنترل شکوفایی مضر جلبکی می‌تواند اثراتی را بر موجودات دیگر و پیکره محیط‌زیست آبی آن‌ها داشته باشد می‌توان بر اساس تحقیقات مختلف که توسط محققان مختلف انجام‌شده است نتیجه گرفت که هیچ‌یک از این فن‌های کنترل شکوفایی مضر پلانکتونی به‌طور خاص بی‌تأثیر نیست ولیکن برای رفع این مشکل در محیط‌های محصور و در یک مکان کوچک می‌توان از آن‌ها البته با توجه به شرایط محیط و همچنین نوع گونه‌ای که مشکل ایجاد کرده است استفاده کرد. استفاده از روش فیزیکی (استفاده از خاک رس) که خطرات کمتری ایجاد می‌کند در محیط‌های دریایی بیشتر پیشنهاد و استفاده می‌شود. در این میان براساس گونه مضر شکوفا شده و میزان تراکم و وسعت منطقه مورد استرس درصد رس و غلظت دوغاب خاک رس می‌تواند متغیر باشد. همچنین جهت استفاده از روش بیولوژیکی نیز بسته به محیط، نوع گونه شکوفا شده و اینکه آیا در یک محیط محصور باشد یا خیر می‌توان از گونه‌های چرا کننده و یا باکتریایی و نیز جلبک‌های ماکروسکوپی استفاده کرد که البته استفاده از جلبک‌های ماکروسکوپی با توجه به گونه مضر شکوفا شده و همچنین خود گونه‌های جلبکی ماکروسکوپی که بومی منطقه باشد آسیب کمتری به محیط آبی دریایی می‌تواند داشته باشد که در این شرایط هم استفاده از خود بافت تازه و زنده جلبک و کاشت ماکرو جلبک‌ها مناسب‌تر می‌باشد. روش شیمیایی به دلیل اینکه اثرات نامطلوبی بر تمامی موجودات موجود در پیکره آبی می‌تواند داشته باشد استفاده از آن در محیط‌زیست و مناطق مورداستفاده آبزی‌پروری رایج و مناسب نیست و بیشتر جهت کنترل و حذف کامل سلول‌های جلبکی و میکروبی در تصفیه‌خانه‌ها و آب‌شیرین‌کن‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد.

منابع:

۱- قرنجیک، ب.م.، روحانی قادیکلایی، ک.، ۱۳۸۹. اطلس جلبک‌های دریایی سواحل خلیج‌فارس و دریای عمان. انتشارات موسسه تحقیقات شیلات ایران. ۲۰۲ صفحه مصور.

۲- روحانی قادیکلایی، ک.، گرگیج جاسکی، م.، ۱۳۹۵. پلانکتون‌های دریایی. انتشارات اسرار دانش. صفحات ۹۸-۹۴.

۳- معزی، م.، روحانی قادیکلایی، ک.، عبدالعلیان، ع.، فروغی فرد، ح.، غریب‌نیا، م.، ۱۳۹۲. مطالعه تأثیر پارامترهای فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی بر روی رشد و شکوفایی جلبک تاژکدار *Cochlodinium polkrikoides*. گزارش نهائی پروژه، مؤسسه تحقیقات شیلات ایران، ۱۰۷ صفحه.

۴- نصراله‌زاده ساروی، ح.، مخلوق، آ.، پورغلام، ر.، رحمتی، ر.، ۱۳۹۱. استراتژی گونه‌های غالب فیتوپلانکتون با تأکید بر طبقه‌بندی اندازه آن‌ها در سواحل ایرانی حوزه جنوبی دریای خزر. اقیانوس‌شناسی. سال سوم، شماره ۱۰، صفحات ۵۷-۴۵.

5- **Anderson, D.M., 2004.** Prevention, control, and mitigation of harmful algal blooms: multiple approaches to HAB management. *Harmful Algae Management and Mitigation*, pp.123-130.
6- Beaulieu, S.E., Sengco, M.R. and Anderson, D.M., 2005. Using clay to control harmful algal blooms: deposition and resuspension of clay/algal flocs. *Harmful algae*, *4*(1), pp.123-138.
7- Bibak, M. and Hosseini, S.A., 2013. Review ways to control harmful algal bloom (HAB). *World J Fish Mar Sci*, *5*, pp.42-44.
8- Brussaard, C.P., 2004. Viral Control of Phytoplankton Populations-a Review 1. *Journal of Eukaryotic Microbiology, 51*
9- (2), pp.125-138.
10- Choi, H.G., KIM, P.S., Lee, W.C., Yun, S.J., Kim, H.G. and Lee, H.J., 1998. Removal efficiency of *cochiodinium polykrikoides* by Yellow Loess. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 31(1), pp.109-113.
11- Chorus, I. and Bartram, J., 1999. Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management. CRC Press.
12- Gobler, C.J., Berry, D.L., Anderson, O.R., Burson, A., Koch, F., Rodgers, B.S., Moore, L.K., Goleski, J.A., Allam, B., Bowser, P. and Tang, Y., 2008. Characterization, dynamics, and ecological impacts of harmful *Cochlodinium polykrikoides* blooms on eastern Long Island, NY, USA. *Harmful Algae*, *7*(3), pp.293-307.
13- Granéli, E. and Turner, J.T., 2006. An introduction to harmful algae. In *Ecology of harmful algae* (pp. 3-7). Springer, Berlin, Heidelberg.
14- Hasler, A.D. and Jones, E., 1949. Demonstration of the antagonistic action of large aquatic plants on algae and rotifers. Ecology, 30(3), pp.359-364.
15- Hosseini, S.F., Rezaei, M., Zandi, M. and Ghavi, F.F., 2013. Preparation and functional properties of fish gelatin–chitosan blend edible films. *Food chemistry, 136*(3-4), pp.1490-1495.
16- Jeong, H.J., Kim, J.S., Du Yoo, Y., Kim, S.T., Song, J.Y., Kim, T.H., Seong, K.A., Kang, N.S., Kim, M.S., Kim, J.H. and Kim, S., 2008. Control of the harmful alga *Cochlodinium polykrikoides* by the naked ciliate Strombidinopsis jeokjo in mesocosm enclosures. *Harmful algae*, *7*(3), pp.368-377.
17- Jin, Q., Dong, S. and Wang, C., 2005. Allelopathic growth inhibition of Prorocentrum micans (Dinophyta) by Ulva pertusa and Ulva linza (Chlorophyta) in laboratory cultures. *European Journal of Phycology*, *40*(1), pp.31-37.
18- Joyce, E.M., Wu, X. and Mason, T.J., 2010. Effect of ultrasonic frequency and power on algae suspensions. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, *45*(7), pp.863-866.
19- Koji, K., Yuki, M. and Naganuma, T., 1998. Removal of biofouling and red tide algae by Triosyn agent. In Abstract of 2nd Meeting for Japan Marine Biotechnology (p. 89).
20- Landsberg, J.H., 2002. The effects of harmful algal blooms on aquatic organisms. *Reviews in Fisheries Science*, *10*(2), pp.113-390.
21- Matsuoka, K., Iwataki, M. and Kawami, H., 2008. Morphology and taxonomy of chain-forming species of the genus Cochlodinium (Dinophyceae). *Harmful Algae*, *7*(3), pp.261-270.
22- Matsuoka, K., Iwataki, M. and Kawami, H., 2008. Morphology and taxonomy of chain-forming species of the genus Cochlodinium (Dinophyceae). *Harmful Algae*, *7*(3), pp.261-270.
23- Padilla, L. and Azanza, R., 2006. Preliminary Results On The Use Of Clay To Control Pyrodinium Bloom-A Mitigation Strategy. *Science Diliman*, *18*(1), pp.35-42.
24- Pierce, R.H., Henry, M.S., Higham, C.J., Blum, P., Sengco, M.R. and Anderson, D.M., 2004. Removal of harmful algal cells (Karenia brevis) and toxins from seawater culture by clay flocculation. *Harmful Algae*, *3*(2), pp.141-148.
25- Rajasekhar, P., Fan, L., Nguyen, T. and Roddick, F.A., 2012. A review of the use of sonication to control cyanobacterial blooms. *Water research*, *46*(14), pp.4319-4329.
26- Secher, S., 2009. Measures to control harmful algal blooms. *The Plymouth Student Scientist*, *2*(1), pp.212-227.
27- Sfriso, A. and Pavoni, B., 1994. Macroalgae and phytoplankton competition in the central Venice lagoon. Environmental Technology, 15(1), pp.1-14.

28- Shen, P.P., Li, Y.N., Qi, Y.Z., Zhang, L.P., Tan, Y.H. and Huang, L.M., 2012. Morphology and bloom dynamics of *Cochlodinium geminatum* (Schütt) Schütt in the Pearl River Estuary, South China Sea. *Harmful algae*, *13*, pp.10-19.
29- Song, Y.C., Sivakumar, S., Woo, J.H., Ko, S.J., Hwang, E.J. and Jo, Q., 2010. Removal of *Cochlodinium polykrikoides* by dredged sediment: a field study. *Harmful Algae*, *9*(2), pp.227-232.
30- Steidinger, K.A., 1975. *Basic factors influencing red tides* (pp. 153-162). Florida Department of Natural Resources Marine Research Laboratory.
31- Tillmann, U., 2004. Interactions between Planktonic Microalgae and Protozoan Grazers1. *Journal of eukaryotic microbiology*, *51*(2), pp.156-168.
32- Verlecar, X.N. and Desai, S.R., 2004. Phytoplankton identification manual.
33- Xu, N., Duan, S., Li, A., Zhang, C., Cai, Z. and Hu, Z., 2010. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful dinoflagellate Prorocentrum donghaiense Lu. *Harmful Algae*, *9*(1), pp.13-17.
34- **Yasuwo, F., 2006.** Threats to global food security - Harmful algal blooms, microbial and chemical agents. ***Series on Sea and Human Security***.Workshop on Food Security.1-6 October 2006, Hiroshima, Japan. *Asian Natural Environmental Science Centre, The University of Tokyo*.
35- Zheng, T.L., Su, J.Q., Maskaoui, K., Yu, Z.M., Hu, Z., Xu, J.S. and Hong, H.S., 2005. Microbial modulation in the biomass and toxin production of a red-tide causing alga. *Marine pollution bulletin*, *51*(8-12), pp.1018-1025.
36- Zhou, L.H., Zheng, T.L., Wang, X., Ye, J.L., Tian, Y. and Hong, H.S., 2007. Effect of five Chinese traditional medicines on the biological activity of a red-tide causing alga—Alexandrium tamarense. *Harmful Algae*, *6*(3), pp.354-360.