2022, Vol.9, No.3, Pages 127 to 140
Journal of Water and Sustainable Development

سال نهم، شماره ۳، ۱۴۰۱، صفحات ۱۲۷ تا ۱۴۰
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Review Article / Technical paper

نوع مقاله: مروری/فنی ترویجی

An Overview of the Technologies Used for Water Purification in Aquaculture Systems with an Emphasis on the Model of Sustainable Development in Iran

A.R. Radkhah[1*], S. Eagderi[2], E. Sadeghinejad Masouleh[3]

1,2-Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. 3- Research Instructor, Inland Waters Aquaculture Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Bandar-e Anzali, Iran.

*(Corresponding Author Email: alirezaradkhah@ut.ac.ir)

Received: 07-05-2022 Revised: 06-08-2022
Accepted: 21-08-2022 Available Online: 21-12-2022

مروری بر فناوری‌های مورد استفاده جهت پالایش آب در سیستم‌های آبزی‌پروری با تأکید بر الگوی توسعه پایدار در ایران

علیرضا رادخواه[1*]، سهیل ایگدری[2]، اسماعیل صادقی‌نژاد ماسوله[3]

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکترا و دانشیار، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ۳- مربی پژوهشی، پژوهشکده آبزی‌پروری آب‌های داخلی، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندر انزلی، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: alirezaradkhah@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

Abstract

One of the main limitations in the development of the aquaculture industry in Iran is access to fresh water with good quality. This requires the development of sustainable technologies for aquaculture wastewater treatment. The present study investigates breeding technologies in order to save water consumption in Iran's aquaculture systems, relying on the model of sustainable development. In this research, the innovations created in aquaculture wastewater treatment in recirculating aquaculture systems (RASs), aquaponics and integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) systems have been discussed. A recirculating aquaculture system, which treats wastewater by removing toxic pollutants and recycling water, requires only 10% of the total volume of fresh water to produce of fish. Therefore, this system helps to save water. However, it has limitations, the most important of which is the accumulation of nitrates in the system, high economic cost, and difficult management, which is achieved by converting nutrients from aquaculture effluents into algal biomass. In addition to RASs, aquaponics is a food production system that combines conventional aquaculture methods and RASs. This method includes aquaculture and plant cultivation, which shows the integration of aquaculture-agriculture activities. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) includes the use of symbiotic organisms in breeding systems that optimizes the balance of nutrients and purifies the wastewater resulting from aquaculture activities. This method shows the combination of different nutritional levels that organic and inorganic effluents are used by different organisms.

Keywords: Aquaculture Wastewater, Water Treatment, Recirculating Aquaculture System, Aquaponics, Sustainable Development.

چکیده

یکی از محدودیت‌های اصلی در مسیر توسعه صنعت آبزی‌پروری در ایران، دسترسی به آب شیرین با کیفیت مطلوب است. این امر سزاور استفاده از فناوری‌های مناسب برای تصفیه پساب‌های آبزی‌پروری است. مطالعه حاضر به بررسی فناوری‌های پرورشی به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب در سیستم‌های آبزی‌پروری ایران با تکیه بر الگوی توسعه پایدار پرداخته است. در این تحقیق، نوآوری‌های ایجاد شده در تصفیه پساب‌های آبزی‌پروری در سیستم‌های پرورشی مداربسته، آکواپونیک و سیستم‌های یکپارچه چندمنظوره (IMTA) مورد بحث قرار گرفته است. سیستم آبزی‌پروری مداربسته (RAS) که پساب را با حذف آلاینده‌های سمی و بازیافت آب، پالایش می‌کند، تنها به ۱۰ درصد از حجم کل آب شیرین برای تولید ماهی نیاز دارد. ازاین‌رو، این سیستم به صرفه‌جویی آب کمک می‌کند. اما بااین‌حال محدودیت‌هایی دارد، از جمله مهمترین آن‌ها تجمع نیترات در سیستم، هزینه اقتصادی زیاد و مدیریت دشوار آن می‌باشد که با تبدیل مواد مغذی حاصل از پساب آبزی‌پروری به زیست‌توده جلبکی می‌توان بر این محدودیت‌ها پیروز شد. علاوه‌بر سیستم‌های آبزی‌پروری مداربسته، آکواپونیک یک سیستم تولید مواد غذایی است که شیوه‌های مرسوم آبزی‌پروری و سیستم مداربسته را با هم ترکیب می‌کند. این روش شامل پرورش آبزیان و کشت گیاهان می‌باشد که به نوعی پیوند فعالیت‌های آبزی‌پروری-کشاورزی را نشان می‌دهد. آبزی‌پروری یکپارچه چندمنظوره (IMTA) شامل استفاده از ارگانیسم‌های هم‌زیست در سیستم‌های پرورشی می‌باشد که باعث بهینه‌سازی تعادل مواد مغذی و پالایش پساب فراهم شده از فعالیت‌های آبزی‌پروری می‌شود. این روش ترکیبی از سطوح تغذیه‌ای مختلف را نشان می‌دهد، ازاین‌رو، پساب‌های حاوی مواد آلی و معدنی توسط موجودات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: پساب آبزی‌پروری، تصفیه آب، سیستم آبزی‌پروری مدار بسته، آکواپونیک، توسعه پایدار.

HomePage: https://jwsd.um.ac.ir

How to cite this article: Radkhah A.R., Eagderi S. and Sadeghinejad Masouleh E. 2022. An Overview of the Technologies Used for Water Purification in Aquaculture Systems with an Emphasis on the Model of Sustainable Development in Iran. Journal of Water and Sustainable Development, 9(3): 127-140. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v9i3.2205.1150

مقدمه

آبزی‌پروری در مقایسه با فعالیت‌های کشاورزی، دامپروری و صیادی به‌عنوان یک صنعت نوپا شناخته می‌شود. در بیشتر نواحی آسیا، این فعالیت به یک بخش اقتصادی تبدیل شده است که با حمایت دولت و مشارکت قوی بخش خصوصی بهتر سازماندهی می‌شود (رادخواه و همکاران، ۱۳۹۹). صنعت آبزی‌پروری به‌منظور تحقق اهداف مختلف از جمله تولید غذای بیشتر، کسب درآمدهای بالاتر و بهبود اقتصاد گسترش یافته و شامل تضمین امنیت غذایی، کاهش فقر و ارتقای رفاه اجتماعی می‌شود (Kongkeo، ۲۰۰۱؛ Kim و همکاران، ۲۰۲۲). در طی ۲۰ سال گذشته، آبزی‌پروری در آسیا از یک روش سنتی به یک فعالیت مبتنی بر علم تبدیل شده است. این صنعت بسیار مهم به یک بخش قابل توجه برای تولید مواد غذایی تبدیل شده است به‌طوری‌که کمک بیشتری به اقتصاد ملی کرده و شرایط معیشتی بهتری را برای خانواده‌های روستایی و کشاورز فراهم کرده است. بر اساس آمار سازمان FAO (۲۰۲۲)، کل تولیدات شیلات و آبزی‌پروری در سال ۲۰۲۱ به حدود ۲۱۴ میلیون تن رسید که شامل ۱۷۸ میلیون تن جانوران آبزی و ۳۶ میلیون تن جلبک است که بیشتر به دلیل رشد آبزی‌پروری به‌ویژه در آسیا صورت گرفته است. این آمار نشان دهنده رشد تولیدات آبزی‌پروری در کشورهای آسیایی می‌باشد که از بعد جهانی نیز بسیار اهمیت دارد (FAO، ۲۰۲۲). در مقابل تولیدات آبزی‌پروری، سهم مصرف ماهیان نیز افزایش یافته است به‌طوری‌که بر اساس گزارش FAO (۲۰۲۰) پیش‌بینی می‌شود که سهم ماهیان مصرفی توسط انسان که از آبزی‌پروری نشات می‌گیرند از ۵۲ درصد (میانگین در دوره ۲۰۱۸-۲۰۱۶) به ۵۸ درصد در سال ۲۰۲۸ افزایش یابد (FAO، ۲۰۲۰؛ FAO، ۲۰۲۲).

در سال‌های گذشته، صنعت آبزی‌پروری در ایران روند روبه‌رشدی را تجربه کرده است به‌طوری‌که براساس گزارش خدایی (۱۳۹۵)، ایران با تولید ۳۲۰ هزار و ۱۴۷ تُن از انواع محصولات آبزی در رتبه هفدهم دنیا قرار گرفته است. درحالی‌که در منطقه خاورمیانه، صنعت آبزی‌پروری ایران در رتبه نخست قرار دارد و پس از ایران، ترکیه با ۲۳۴ هزار تن و پاکستان با ۱۴۸هزار تن به‌ترتیب در رتبه های دوم و سوم قرار دارند (خدایی، ۱۳۹۵). صالحی (۱۳۹۷) میزان تولید آبزیان در پیش از انقلاب و پس از انقلاب ۱۳۵۷ را بررسی کرد و بیان کرد براساس آمار به‌دست آمده تا سال ۱۳۵۷، مجموع تولید صید و آبزی‌پروری ۳۲ هزار تن بود که ۳ هزار تن از این میزان را آبزی‌پروری و ۲۹ هزار تن را بخش صید و صیادی تشکیل می‌داد، درحالی‌که در سال ۱۳۹۷ میزان تولیدات صید و آبزی‌پروری نزدیک به یک میلیون و ۲۰۰ هزار تن افزایش یافت. همچنین، ارزش صادرات محصولات شیلاتی در سال ۱۳۵۷، مجموعا ۱۱ میلیون دلار بود درحالی‌که در سال ۱۳۹۷ به بیش از ۵۰۷ میلیون دلار رسید. صالحی (۱۳۹۷) میزان سرانه مصرف آبزیان در سال ۱۳۵۷ را یک کیلوگرم و در سال ۱۳۹۷ را بیش از ۱۱ کیلوگرم بیان کرد. همچنین، در سرشماری جدید مرکز آمار ایران (۱۴۰۱)، تعداد مزارع تکثیر و پرورش آبزیان خوراکی کشور در سال ۱۴۰۰ را بیش از ۱۷۰۰۰ واحد برآورد کرد. این سازمان اعلام نمود در پاییز سال ۱۴۰۰، مجموعا ۱۷۶۱۰ واحد تکثیر و پرورش آبزیان در سطح کشور سرشمارش شده که نسبت به سال ۱۳۹۳ حدود ۳۳ درصد افزایش داشته است. آمارهای بیان شده نشان می‌دهد میزان تولیدات آبزی‌پروری ایران در طول سال‌های گذشته روند روبه‌رشدی داشته است.

علاوه‌بر پیشرفت‌هایی که آبزی‌پروری ایران در طی سال‌های گذشته داشته است، این صنعت مهم با چالش‌هایی نیز مواجه بوده است. کم‌آبی و کاهش منابع آب طبیعی از عمده چالش‌هایی هستند که سرنوشت بسیاری از کشورهای جهان به‌ویژه کشورهای در حال توسعه مانند ایران را تحت تأثیر قرار داده‌اند (Nqombolo و همکاران، ۲۰۱۸). از آنجایی‌که بخشی از تأمین غذای انسان وابسته به صنعت آبزی‌پروری می‌باشد، هرگونه چالشی که منجر به کاهش تولیدات آبزی‌پروری شود می‌تواند امنیت غذای انسان را نیز به خطر بیاندازد. ازاین‌رو، شناسایی و رفع چالش‌ها و معضلاتی که تولیدات آبزی‌پروری را تحت تأثیر قرار می‌دهند، یکی از ضروریات اساسی در جامعه امروز می‌باشد. براساس گزارش FAO (۲۰۲۰)، یکی از محدویت‌های اصلی در مسیر توسعه آبزی‌پروری در بسیاری از کشورها، دسترسی به آب با کیفیت می‌باشد که رفع این محدودیت، مستلزم استفاده از فناوری‌های پایدار برای تصفیه پساب‌های آبزی‌پروری و صرفه‌جویی در مصرف آب است.

تاکنون، نگرانی‌های محیط‌زیستی زیادی در مورد آلودگی آب ناشی از فعالیت‌های آبزی‌پروری در سطح جهان مطرح شده است (Martinez-Porchas و Martinez-Cordova، ۲۰۱۲). اجزای آلی موجود در پساب‌های آبزی‌پروری مانند خوراک مصرف نشده و مدفوع باعث عدم مطلوبیت محیط آب و رسوبات می‌شوند (Dauda و همکاران، ۲۰۱۹). مواد آلی محلول و ذرات معلق، کل مواد جامد محلول، مواد مغذی مانند فسفر و نیتروژن اجزاء اصلی پساب‌های آبزی‌پروری را تشکیل می‌دهند که می‌توانند منجر به معضلات محیط‌زیستی شده و همچنین اثرات منفی بر رشد ماهیان داشته باشند (Zheng و همکاران، ۲۰۱۳؛ Martinez-Espineira و همکاران، ۲۰۱۵؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۹). اثر اولیه ناشی از مقادیر بالای پسماند آلی در فاضلاب آبزی‌پروری شامل افزایش فعالیت متابولیکی باکتری‌های هوازی است (Timmons و Lorsodo، ۱۹۹۴؛ Dauda و همکاران، ۲۰۱۹). کمبود اکسیژن برآمده از فعالیت‌های باکتریایی منجر به تخریب حیات هوازی در آب‌ها مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها می‌شود. در این شرایط، امکان احیای سولفات در سیستم‌های بی‌هوازی بسیار بالا است (Sigalevich و همکاران، ۲۰۰۰). این امر باعث مهار همزمان فرآیندهای نیتریفیکاسیون هوازی و نیترات‌زایی می‌شود. کمبود اکسیژن در هر دو فرآیند منجر به مرگ

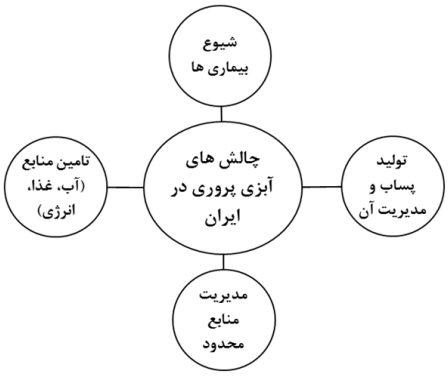
ماکروفونا در رسوبات می‌شود. ورود مواد مغذی حاصل از پساب آبزی‌پروری می‌تواند منجر به فرآیند خوراک‌وِری[1] در دریاچه‌ها و کانال‌های تخلیه شود، از این‌رو، استفاده از روش‌های تصفیه پایدار برای سازگاری با محیط‌زیست الزام‌آور است. اگرچه تاکنون از رویکردهای سنتی تصفیه پساب شامل روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی در سیستم‌های آبزی‌پروری استفاده شده است، اما بااین‌حال، کاربرد فناوری‌های جدید و پایدار برای تصفیه پساب‌های آبزی‌پروری ضروری است. در این پژوهش، فن‌آوری‌های نوآورانه در آبزی‌پروری ایران به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب و همچنین، بهبود فرآیند تصفیه بررسی شده است. در این تحقیق، تلاش شده است، علاوه‌بر معرفی ویژگی هر کدام از فناوری‌ها، مقایسه‌ای بین آن‌ها صورت گیرد. امید است یافته‌های ارائه شده در این مطالعه بتواند در جهت دستیابی به صنعت آبزی‌پروری پایدار که باتوجه‌به میزان منابع آبی یک کشور تحقق می‌یابد، مفید واقع شود. این مسئله در مورد کشورهایی از قبیل ایران که بامشکل کم‌آبی در جهان روبه‌رو هستند، بسیار اهمیت دارد.

مفهوم توسعه پایدار

توسعه پایدار در گزارش کمیسیون برانتلند در سال ۱۹۸۷ به‌عنوان توسعه‌ای تعریف شد که نیازهای نسل حاضر را بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده برای برآوردن نیازهای خود، برآورده می‌کند (IISD، ۲۰۲۲). چهار بُعد برای توسعه پایدار تعریف شده است که شامل جامعه، محیط‌زیست، فرهنگ و اقتصاد می‌باشد. این ابعاد به‌طور کامل در هم تنیده شده‌اند و جدا از یکدیگر نیستند. پایداری به‌عنوان الگویی برای نسل‌های آینده انگاشته می‌شود که در آن مسائل محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی به‌منظور دستیابی به یک زندگی با کیفیت، به حالت تعادل می‌رسند (UNESCO، ۲۰۲۲). لازم به ذکر است دسترسی به منابع آب کافی و با کیفیت و همچنین تأمین بهداشت از جمله پیش‌شرط‌های لازم برای تحقق توسعه پایدار در کشورهای در حال توسعه می‌باشند (Abu-Zeid، ۱۹۹۸).

چالش‌های پیش‌روی توسعه آبزی‌پروری در ایران

در بخش آبزی‌پروری دو هدف کلی وجود دارد که شامل (۱) به حداکثر رساندن نرخ رشد و (۲) به حداقل رساندن هزینه‌های تولید میباشد. نرخ رشد سریع، زمان دستیابی به اندازه قابل فروش را به حداقل می‌رساند و از طرف دیگر، نرخ ریسک را کاهش می‌دهد. کاهش هزینه‌های تولید موجب سودآوری بیشتر در صنعت آبزی‌پروری می‌شود. برای انجام آن، تعدادی استراتژی وجود دارد که همه آن‌ها تا حدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این استراتژی‌ها شامل به حداکثر رساندن تبدیل مواد غذایی و کاهش هزینه‌های آب، نیرو، فرآوری و ذخیره‌سازی می‌باشند (Allen و Steeby، ۲۰۱۱). یکی از چالش‌های اساسی در بخش آبزی‌پروری در ایران، مشکل دسترسی به منابع شامل آب، غذا و انرژی می‌باشد (شکل ۱). باتوجه‌به وضعیت اقلیمی بسیاری از مناطق در ایران، دسترسی به آب با کیفیت مناسب در برخی از نقاط دشوار است، از طرف دیگر، انرژی و هزینه‌های بسیار زیادی نیز باید برای تصفیه آب استفاده شود که خود بخش دیگری از دشواری‌های پیش‌رو را تشکیل می‌دهد. این مسائل در گزارش‌های مختلف از جمله Allen و Steeby (۲۰۱۱) و Tom و همکاران (۲۰۲۱) نیز مطرح شده است، به‌طوری‌که این محققان، چالش‌های اصلی توسعه آبزی‌پروری در کشورهای در حال توسعه مانند ایران را پیرامون مسائل مرتبط با حفاظت از محیط‌زیست، کمبود انرژی و تکنولوژی‌های موجود و کاهش منابع آب (شکل ۱) می‌دانند.



شکل ۱- چالش‌های پیش‌روی توسعه آبزی‌پروری در ایران

تأمین غذا برای سیستم‌های آبزی‌پروری اهمیت ویژه‌ای دارد، چراکه بیش از ۵۰ درصد هزینه‌های تولید را تشکیل می‌دهد و انرژی ورودی برای دستیابی به حداکثر رشد را فراهم می‌کند (FAO، ۲۰۲۱). در صنعت آبزی‌پروری، خوراک از غذای زنده گرفته تا جیره‌های فرموله شده متغیر است و بیشتر با رشد و بلوغ گونه‌ها تغییر می‌کند (Allen و Steeby، ۲۰۱۱). بعد از غذا، آب در قلب صنعت آبزی‌پروری قرار دارد. ازاین‌رو، سوالاتی همچون کیفیت و کمیت آب مطرح می‌شود که در موفقیت عملیات آبزی‌پروری نقش کلیدی دارد. پارامترهای کلیدی لازم برای هستی بیشتر گونه‌های آبزی شامل اکسیژن محلول، دما، شوری، سختی، آمونیاک، نیتریت و میزان اسیدیته آب (pH) می‌باشند. انگیزه بیشتر عملیات آبزی‌پروری، حفظ این متغیرهای کیفیت آب در محدوده‌هایی است که حداکثر رشد را تضمین می‌کنند. بااین‌حال، کاهش مصرف آب و به حداقل رساندن پساب تولیدی نیز بسیار باارزش است. نوع رژیم غذایی اغلب به‌طور مستقیم بر کیفیت آب تأثیر می‌گذارد، چراکه غذای مصرف نشده و غذایی که توانایی هضم بالایی ندارد، باعث ورود مواد مغذی به آب

می‌شود. ورود این مواد مغذی به محیط آب می‌تواند منجر به ایجاد شرایط یوتروفیک شود. ورود مواد مغذی عامل محرکه‌ای برای رشد میکروب‌ها، فیتوپلانکتون‌ها و گیاهان می‌باشد که در نهایت، ممکن است منجر به کاهش کیفیت آب شود. بااین‌حال، مقدار مواد مغذی موجود در پساب با زمان نگهداری آب و نرخ گردش هیدرولیکی پیوسته است. بنابراین، کیفیت آب رابطه مستقیمی با شدت و نوع سیستم آبزی‌پروری مورد استفاده دارد (Allen و Steeby، ۲۰۱۱).

علاوه‌بر موارد گفته شده، توسعه سیستم‌های آبزی‌پروری چالش‌های مختلفی دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به پیدایش آلودگی‌های مختلف و شیوع بیماری‌ها (شکل ۱) اشاره کرد. تولید متراکم آبزیان در محیط پرورشی و استفاده از آنتی بیوتیک‌ها، مواد شیمیایی ضدعفونی‌کننده و آفت‌کش‌ها همگی مشکلاتی هستند که می‌توانند زمینه‌ساز پیدایش آلودگی‌های محیط‌زیستی باشند. به‌طوری‌که اگر چنانچه این موارد مدیریت نشوند، می‌توانند بسیاری از اراضی اطراف را نیز تحت تأثیر قرار دهند (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۰؛ رادخواه و صادقی‌نژاد ماسوله، ۱۴۰۰). پدیدار شدن آلودگی در سیستم‌های پرورشی می‌تواند زمینه‌ساز افزایش عوامل میکروبی در این سیستم‌ها باشد که در نهایت، موجب شیوع بیماری‌هایی می‌شوند که حتی ممکن است از جانوران آبزی به انسان نیز انتقال یابد (Allen و Steeby، ۲۰۱۱).

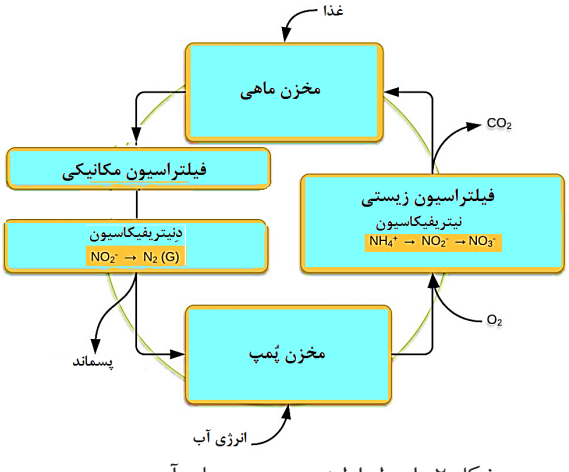
پساب به‌دست آمده از فعالیت‌های آبزی‌پروری که دربرگیرنده مواد جامد معلق، ترکیبات نیتروژن و ترکیبات فسفر است، به‌عنوان یکی از محدودیت‌های اصلی در سیستم آبزی‌پروری مورد توجه قرار گرفته است (شکل ۱) و نیاز به مدیریت ویژه دارد. تصفیه پساب در سیستم‌های آبزی‌پروری به‌منظور تولید ماهی سالم و همچنین، جلوگیری از اثرات زیان‌آور آلاینده‌ها بر محیط‌زیست ضروری است. به‌دلیل بار اقتصادی و مصرف انرژی بالا، محدودیت‌های زیادی برای استفاده از تصفیه‌خانه‌های معمولی در سیستم‌های آبزی‌پروری وجود دارد. علاوه‌برآن، استفاده از روش‌های سنتی تصفیه مانند روش‌های تصفیه هوازی و بی‌هوازی برای پساب آبزی‌پروری، منجر به آزادسازی گازهای گلخانه‌ای مانند CO_2 و CH_4 می‌شود (Dume و همکاران، ۲۰۲۱). ازاین‌رو، بهبود روش‌های سنتی و مرسوم تصفیه برای حفظ پایداری در صنعت آبزی‌پروری ضروری است.

در سیستم‌های آبزی‌پروری، کاهش مصرف آب از طریق دو شیوه؛ (۱) تصفیه پسماند به‌دست آمده از فعالیت‌های پرورشی و (۲) یک کردن آبزی‌پروری با فعالیت‌های کشاورزی قابل اجرا است (Verdegem و همکاران، ۲۰۰۶). استفاده از سیستم آبزی‌پروری مداربسته[۲] (RAS) در جهت بهره‌برداری چندباره از آب و سپس تصفیه آن می‌تواند در راستای کاهش مصرف آب در صنعت آبزی‌پروری مفید باشد. بااین‌حال، یکی‌کردن آبزی‌پروری با فعالیت‌های کشاورزی در شیوه‌های آکواپنیک نیز رویکرد دیگری است که در جهت صرفه‌جویی در مصرف آب به‌دست آمده است.

سازگان آبزی‌پروری مداربسته (RAS)

سیستم‌های متداول آبزی‌پروری به میزان زیادی به آب نیاز دارند، ازاین‌رو، مهمترین عاملی که باید در این سیستم‌ها در نظر گرفته شود، پایداری در تأمین آب است. منابع آب متداول برای آبزی‌پروری شامل آب‌های سطحی مانند رودخانه‌ها، چشمه‌ها، دریاچه‌ها، مخازن و همچنین چاه‌های آب زیرزمینی هستند. جریان آب در این سیستم‌ها باید به اندازه کافی برای رفع نیاز اکسیژن محلول و یا پاک‌سازی پسماندهای متابولیک گونه‌های آبزی کافی باشد. در سیستم‌های متداول آبزی‌پروری، تنها در صورتی می‌توان به خود تمیزشوندگی دست یافت که سرعت جریان به اندازه کافی در سیستم زیاد باشد. محدودیت‌های سیستم آبزی‌پروری متداول و معمولی را می‌توان با استفاده از سیستم آبزی‌پروری مداربسته (RAS) برطرف نمود (Waller، ۲۰۰۱؛ Tom و همکاران، ۲۰۲۱).

سیستم آبزی‌پروری مداربسته (RAS) پساب را با حذف آلاینده‌های سمی و بازیافت آب تصفیه شده، پالایش می‌کند. بنابراین، تااندازه‌ای حجم کمی از آب برای تولید مقادیر زیادی ماهی در سیستم‌های RAS استفاده می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲- اصول اولیه در سیستم‌های آبزی‌پروری مدار بسته (Aquaculture ID، ۲۰۲۲)

پساب را می‌توان به‌طور جزئی یا کامل به مخازن ماهی برگرداند. سیستم آبزی‌پروری مدار بسته ۵ تا ۱۰ درصد جایگزینی آب در روز را بسته به عرضه و نرخ تغذیه خواهد داشت (NFDB، ۲۰۲۲). استفاده از سیستم‌های آبزی‌پروری مدار بسته اثر آلودگی بر پرورش ماهی را کاهش می‌دهد و علاوه‌برآن، استفاده از آب شیرین و پاک را نیز به‌حداقل می‌رساند (Dauda و Akinwole، ۲۰۱۴). ازاین‌رو، می‌توان بیان نمود، این نوع از سیستم‌های آبزی‌پروری، سازگار با محیط‌زیست هستند. حذف مواد جامد، مواد آلی، آمونیاک و نیتریت برای توسعه سیستم‌های آبزی‌پروری مدار بسته حیاتی است (Zheng و همکاران، ۲۰۱۳). در سیستم‌های آبزی‌پروری مدار

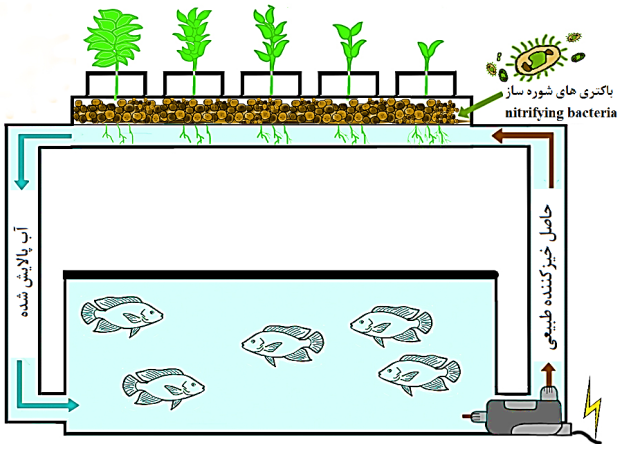
بسته، ماهی‌ها را می‌توان در کنار سایر ارگانیسم‌ها پرورش داد، چراکه مواد مغذی ناشی از پسماند رها شده ماهیان می‌تواند توسط سایر ارگانیسم‌ها مصرف شود (Dauda و همکاران، ۲۰۱۹). این وضعیت می‌تواند سیستم را پایدارتر از سیستم‌های گذشته کند.

حذف پسماند در سیستم‌های مدار بسته از شیوه حذف فیزیکی جامدات و تبدیل آمونیاک و نیتریت به نیترات از شیوه فرآیند نیتریفیکاسیون انجام می‌شود. لازم به ذکر است نیتریفیکاسیون نمی‌تواند منجر به کاهش کلی ضایعات نیتروژنی شود، بلکه تنها آمونیاک را به نیترات تبدیل می‌کند و در نتیجه باعث تجمع نیترات و کاهش اسیدیته (pH) آب می‌شود (AWWA، ۲۰۰۲). ازاین‌رو، سیستم‌های مدار بسته به ۱۰ تا ۲۰ درصد تبادل آب در هر روز نیاز دارند تا تجمع نیترات را کاهش دهند و آب با کیفیت مناسب را برای حیات آبزیان تأمین نمایند (Martins و همکاران، ۲۰۱۰).

غلظت بالای نیترات در سیستم مدار بسته برای ماهیان سمی است و می‌تواند منجر به یوتریفیکاسیون، کاهش اکسیژن و سمیت در سیستم‌های آبزی‌پروری شود (Dauda و Akinwole، ۲۰۱۴؛ Aquaculture ID، ۲۰۲۲). استفاده از بیوفیلترهای نیترات‌زدایی[۳] در سیستم مدار بسته جهت کاهش هزینه انرژی و بهبود کارایی این سیستم موثر است و هزینه عملیات را تا ۱۰ درصد کاهش می‌دهد (Preena و همکاران، ۲۰۲۱). نیترات‌زدایی در بیوفیلترها باعث می‌شود ترکیبات نیتروژن معدنی مانند نیتریت و نیترات به نیتروژن عنصری تبدیل شوند (Moloantoa و همکاران، ۲۰۲۲). این فرآیند با محدودیت‌هایی همراه است، چراکه نیازمند پرسنل ماهر برای بهره‌برداری و نگهداری فیلترها است. کاستی‌های استفاده از سیستم مدار بسته و جستجو برای یافتن راه‌حلی بهتر، منجر به بروز فناوری‌های نوآورانه در این زمینه می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به یکی کردن روش‌های گیاه پالایی در سیستم‌های مدار بسته اشاره کرد. بررسی تحقیقات گذشته و همچنین آموخته‌های محققان نشان داده است، یکی کردن این روش‌ها با سیستم‌های مدار بسته در بهبود کارایی تصفیه، موفقیت‌آمیز بوده است. موید این نکته گزارش‌هایی است که پیرامون حذف قابل توجه جامدات معلق، مواد آلی، نیتروژن، فسفر، عناصر کمیاب و میکروارگانیسم‌ها در پساب‌های آبزی‌پروری ارائه شده است (Tom و همکاران، ۲۰۲۱).

استفاده از آکواپونیک در سیستم مدار بسته

آکواپونیک یک سیستم تولید مواد غذایی است که شیوه‌های گسترش یافته آبزی‌پروری و سیستم مدار بسته را با هم ترکیب می‌کند (شکل ۳). روش گفته شده شامل پرورش جانوران آبزی از قبیل حلزون، ماهی، خرچنگ یا میگو در مخازن هیدروپونیک است. این امر با کشت گیاهان در آب، در یک محیط هم‌زیست به‌دست می‌آید (Stathopoulou و همکاران، ۲۰۱۸). در سیستم‌های متداول آبزی‌پروری، مواد دفعی به‌دست آمده از موجودات پرورش یافته می‌تواند در آب تجمع یابد و در نهایت، موجب افزایش سمیت در محیط شود. در سیستم آکواپونیک، آب از یک سیستم آبزی‌پروری به سیستم هیدروپونیک منتقل می‌شود. در سیستم هیدروپونیک، مواد مورد نظر توسط باکتری‌ها به نیترات و آمونیوم تجزیه می‌شوند که توسط گیاهان به‌عنوان مواد مغذی استفاده می‌شوند. سپس، آب دوباره به سیستم آبزی‌پروری بازگردانده می‌شود (Tyson و همکاران، ۲۰۱۱؛ Dunwoody، ۲۰۱۳). بنابراین، سیستم آکواپونیک ترکیبی از جانوران و گیاهان آبزی می‌باشد. گیاهان را می‌توان به‌طور هم‌زمان در سیستم‌های آبزی‌پروری و در زمانیکه در فضای باز یا در ساختمان‌هایی با نور کافی قرار می‌گیرند، کشت کرد. شایان ذکر است، چند نوع گیاه در سیستم آکواپونیک استفاده می‌شود که شامل گیاهان شناور و غوطه‌ور می‌باشند. گیاهان شناور به‌طور طبیعی با برگ‌های خود در بالای سطح آب شناور هستند، درحالی‌که ریشه‌های آن‌ها در آب معلق می‌باشد. از گیاهان شناوری که به‌طور متداول در سیستم‌های آبزی‌پروری قابل کشت هستند، می‌توان به کاهوی آبی (*Pistia sp.*)، سنبل آبی (*Eichhoria crassipes*) و سرخس آبی (*Azolla sp.*) اشاره کرد (شکل ۴). لازم به ذکر است از این گیاهان می‌توان به‌عنوان غذا برای ماهی‌های گیاه‌خوار مانند تیلاپیا و کپور علفخوار استفاده کرد. علاوه‌برآن، گیاهان مذکور در کاهش رشد فیتوپلانکتون‌ها در آب نیز مفید هستند (Mohebi و Nazari، ۲۰۲۱). به‌عنوان مثال، سنبل آبی می‌تواند در طول یک روز، بیش از یک گرم نیتروژن در هر متر مربع از سیستم پرورشی را حذف نماید (Jusoh و همکاران، ۲۰۲۰).



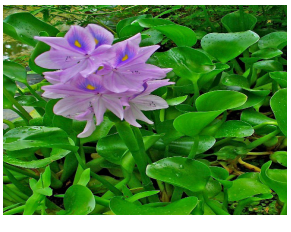
شکل ۳- نمایی از یک سیستم آکواپونیک. ماهیان، گیاهان، باکتری‌ها و آب اجزای اصلی یک سیستم آکواپونیک را تشکیل می‌دهند (Growing Passion، ۲۰۲۲)

یکی از نکات مهم در مورد گیاهان موجود در سیستم‌های آبزی‌پروری، انتخاب نوع نیتروژن ترجیحی می‌باشد که می‌تواند شامل نیتروژن آمونیومی یا نیتروژن نیتراتی باشد. در واقع، گیاهان می‌توانند نیتروژن را به‌صورت نیترات (NO_3^-) یا آمونیوم (NH_4^+) جذب کنند، بنابراین جذب کل نیتروژن بیشتر ترکیبی از این دو شکل است. ترجیح نوع نیتروژن برای گونه‌های گیاهی مختلف، متفاوت است. هر گونه گیاهی برای جذب و رشد بهینه به نسبت متفاوتی از آمونیوم و نیترات نیاز دارد که این نسبت نیز باتوجه‌به دما، مرحله رشد گیاه، میزان pH در ناحیه ریشه و عوامل دیگر متفاوت است (Boudsocq و همکاران، ۲۰۱۲). هنگامی‌که سطح آمونیوم بالاتر است، قندها باید از برگ‌ها به ریشه منتقل شوند تا آمونیوم متابولیزه شود. در گیاهان گل‌دار و بارده مانند گوجه‌فرنگی و خیار و گیاهانی که بیشترین رشد را در برگ‌ها دارند (مانند کلم، کاهو، اسفناج)، قندها به‌سرعت در نزدیکی محل تولید مصرف می‌شوند و برای انتقال به ریشه بسیار کمتر در دسترس هستند. در این حالت، آمونیوم به‌طور مؤثر متابولیزه نمی‌شود و استفاده از نسبت پایین‌تر آمونیوم به نیترات برتری دارد (علیزاده، ۱۴۰۱). بسیاری از گیاهان آبزی مانند کاهوی آبی، سنبل آبی و سرخس آبی اغلب از نیتروژن نیتراتی استفاده می‌کنند.

دو تکنیک جدا از هم ممکن است برای کاهش مصرف انرژی استفاده شود: (۱) استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و (۲) کاهش پمپاژ آب. در مورد تکنیک دوم می‌توان بیان داشت با کاهش تعداد پمپ‌ها به حداقل و بهینه‌سازی جریان آب، ممکن است در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود. یافتن تعادل صحیح بین این دو عنصر می‌تواند مصرف انرژی را کاهش دهد و در عین حال، بهره‌وری و سودآوری سیستم را افزایش دهد (Tom و همکاران، ۲۰۲۱).

در سیستم‌های دریایی از گیاهان مقاوم به شوری، برای تصفیه پسماند استفاده می‌شود (Brown و همکاران، ۱۹۹۹؛ Buhmann و Papenbrock، ۲۰۱۳). این گیاهان با جذب نیترات، فسفات و سایر ترکیبات به‌عنوان فیلترهای زیستی عمل می‌کنند. این مسئله می‌تواند بر حضور مناطق اکسیژن‌دار در خاک تأثیر بگذارد و موجب رشد باکتری‌های خاص و فرآیندهایی مانند آمونیفیکاسیون و نیتریفیکاسیون شود (Brown و همکاران، ۱۹۹۹).

کاهوی آبی (*Pistia sp.*)



سنبل آبی (*Eichhoria crassipes*)

سرخس آبی (*Azolla sp.*)

شکل ۴- نمونه‌ای از گیاهان آبزی قابل کشت در سیستم‌های آکواپونیک (Latour Marliac، ۲۰۲۲؛ IFAS، ۲۰۲۲؛ Jardineria، ۲۰۲۲)

سیستم‌های پرورشی مبتنی بر ریزجلبک‌ها

مفهوم آبزی‌پروری استوار بر ریزجلبک‌ها، به معنای تبدیل مواد آلی موجود در پساب‌های یوتروفیک به زیست‌توده[۴] و رشد ریزجلبک‌ها است که این زیست‌توده می‌تواند تا حدی جایگزینی برای خوراک آبزی‌پروری و افزایش ایمنی جانوران آبزی باشد. همچنین، ساخت یک سیستم برپایه ریزجلبک می‌تواند پایداری دی اکسید کربن را افزایش دهد، باعث آزاد شدن اکسیژن شود و مانند یک پمپ زیستی عمل کند. برآیند این عوامل می‌تواند محیط مناسبی را برای جانوران آبزی فراهم سازد. ریزجلبک‌ها مواد مغذی موجود در پساب آبزی‌پروری را جذب می‌کنند و ازاین‌رو، زیست‌توده جلبک را می‌توان برداشت نمود و از آن به‌عنوان خوراک آبزی‌پروری استفاده کرد (Nagappan و همکاران، ۲۰۲۱). محدودیت‌های اصلی فناوری سیستم مدار بسته (RAS) شامل هزینه‌های زیاد سرمایه‌گذاری و نگهداری سیستم می‌باشد که با تبدیل مواد مغذی به‌دست آمده از پساب آبزی‌پروری به زیست‌توده جلبکی می‌توان بر این محدودیت‌ها پیروز شد. این امر می‌تواند به‌طور هم‌زمان فرآیند تصفیه را نیز بهبود بخشد (Maiga و همکاران، ۲۰۱۷؛ Omondi و Navalia، ۲۰۲۰). استفاده از ریزجلبک‌ها به‌عنوان خوراک می‌تواند اثرات محیط‌زیستی پرورش ماهیان را کاهش دهد (Nagappan و همکاران، ۲۰۲۱). کشت جلبک در سیستم‌های تصفیه پسابی که برآمده از فعالیت‌های آبزی‌پروری هستند، می‌تواند به‌منظور تولید زیست‌توده و همچنین برای تولید لیپید استفاده شود، چراکه این سیستم‌ها بی چون و چرا دوستدار محیط‌زیست بوده و از نظر اقتصادی نیز برای رواج دادن مفهوم هم‌زیستی و پایداری مورد توجه هستند (Tossavainen و همکاران، ۲۰۱۹). براساس مطالعه Abdel-Raouf و همکاران (۲۰۱۲)، جلبک‌های رشد یافته در پساب‌های غنی از نیتروژن (N)، منابع با ارزشی از ترکیبات نیتروژنی مفید مانند آنتی‌اکسیدان‌ها را تشکیل می‌دهند. اگرچه استفاده از جلبک‌ها در سیستم‌های مدار بسته با مزایای مختلفی همراه است، اما بااین‌حال، وجود مواد مغذی اضافی در این سیستم‌ها می‌تواند پیامدهای نامطلوبی مانند شکوفایی جلبکی را به همراه داشته باشد.

از جمله اثرات ناشی از افزایش ریزجلبک‌ها در سیستم‌های آبزی‌پروری، می‌توان به تولید سموم مختلف اشاره کرد که بیشتر با

شکوفایی جلبک‌ها یا رشد سریع و بی‌اندازه متراکم جلبک‌ها همراه است (Pelley، ۲۰۱۶). افزایش متراکم جلبک‌ها حتی جلبک‌های غیرسمی می‌تواند برای جانوران پرورش یافته به یک فاجعه تبدیل شود، چراکه شکوفایی جلبک‌ها میزان اکسیژن آب را در بسیاری از سیستم‌های آبزی‌پروری کاهش می‌دهد و ازاین‌رو، حیات آبزیان مانند ماهی‌ها را به خطر می‌اندازد. اثرات ناشی از شکوفایی میکروجلبک‌ها بسیار متفاوت است. برخی از جلبک‌ها فقط در تراکم‌های بسیار بالا سمی هستند، درحالی‌که برخی دیگر در تراکم‌های بسیار کم (چند سلول در لیتر) می‌توانند سمی باشند (Hofbauer، ۲۰۲۱). افزایش برخی از جلبک‌ها در سیستم‌های آبزی‌پروری می‌تواند رنگ آب را تغییر دهد، درحالی‌که اثرات بعضی دیگر از جلبک‌ها بر ویژگی‌های آب کم‌وبیش غیرقابل تشخیص است (Banrie، ۲۰۱۳).

یکی دیگر از اثرات مهم برآمده از افزایش ریزجلبک‌ها در سیستم‌های آبزی‌پروری، گرفتگی لوله‌ها، اتصالات و غیره می‌باشد (Banrie، ۲۰۱۳). باتوجه‌به افزایش بار مواد مغذی در سیستم‌های پرورشی، بسیاری از گونه‌های جلبکی امکان شکوفایی پیدا نمی‌کنند. شکوفایی جلبک‌ها علاوه‌بر تأثیرات مستقیمی که بر کیفیت آب سیستم پرورشی می‌گذارد، بسیاری از محل‌های ورودی و خارجی آب مانند لوله‌ها و اتصالات را نیز اشغال می‌نمایند که به مرور زمان، منجر به گرفتگی لوله‌ها و قطع جریان آب می‌شود. بررسی اثرات برآمده از شکوفایی ریزجلبک‌ها در کشورهای مختلف نشان داده است که این پدیده با زیان‌های اقتصادی فراوانی همراه است. به‌عنوان‌مثال، در ایالات متحده آمریکا، اثرات اقتصادی برآمده از افزایش ریزجلبک‌ها در سیستم‌های آبزی‌پروری بیش از ۴۰ میلیون دلار در سال یا ۱ میلیارد دلار در هر دهه است برآورد شده است (Hudnell، ۲۰۰۸). به‌طورکلی، افزایش ریزجلبک‌ها در سیستم‌های آبزی‌پروری، به‌ویژه سیستم‌های مدار بسته، باعث بروز مشکلات مختلف برای آبزی پرورشی و همچنین، گرفتگی لوله و اتصالات و غیره می‌شود. باتوجه‌به این موضوع، برداشت ریزجلبک‌ها پس از تصفیه پساب به پیشگیری از این مشکل کمک می‌کند. انعقاد/لخته‌سازی، سانتریفیوژ و فیلتراسیون سه روش برداشت هستند که برای کاربردهای مختلف مانند سوخت زیستی، غذای انسان و حیوان و بازسازی کیفیت آب استفاده می‌شوند (Branyikova و همکاران، ۲۰۱۸؛ Matter و همکاران، ۲۰۱۹؛ Najjar و Abu-Shamleh، ۲۰۲۰).

سیستم آبزی‌پروری یکپارچه چندمنظوره

صنعت آبزی‌پروری برای ادامه رشد نیاز به توسعه فناوری‌ها و شیوه‌های نوآورانه‌تر، مسئولانه‌تر، پایدار و سودآور دارد که باید از نظر محیط‌زیستی کارآمد و بی‌خطر و از نظر اجتماعی سودمند باشند. حفظ پایداری در این بخش، نه تنها از دیدگاه محیط‌زیستی، بلکه از دیدگاه اقتصادی، اجتماعی و فنی نیز به یک موضوع کلیدی تبدیل شده است (Ekins و Zenghelis، ۲۰۲۱).

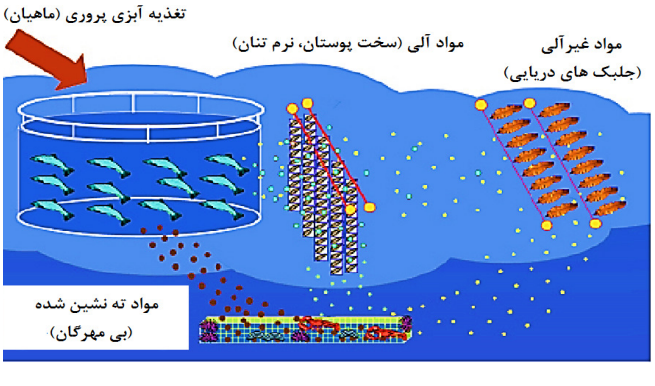
آبزی‌پروری یکپارچه شامل استفاده از ارگانیسم‌های مختلف در سیستم‌های پرورشی می‌باشد که تعادل مواد مغذی را بهینه کرده و جامدات آلی موجود در پساب و رسوبات را کاهش می‌دهد (Alexander و همکاران، ۲۰۱۶). این روش یک رویکرد هم‌زیستی برای تصفیه پساب آبزی‌پروری است (Rosa و همکاران، ۲۰۲۰؛ Correia و همکاران، ۲۰۲۰). در شکل (۵) نمایی کلی از سیستم آبزی‌پروری یکپارچه چندمنظوره[۵] (IMTA) ارائه شده است. این سیستم ترکیبی از سطوح تغذیه‌ای مختلف را نشان می‌دهد (شکل ۵) و از مواد مغذی آلی و معدنی که توسط موجودات مختلف در دسترس است، استفاده می‌کند (Chopin و همکاران، ۲۰۱۰). مفهوم IMTA بسیار انعطاف‌پذیر است، بنابراین می‌توان آن را بر اساس شرایط محیطی، زیستی، فیزیکی، شیمیایی، اجتماعی و اقتصادی توسعه داد. این روش را می‌توان برای سیستم‌های آب‌های آزاد یا زمینی و سیستم‌های دریایی یا آب شیرین به‌کار برد (Chopin و همکاران، ۲۰۱۰).

در سیستم‌های یکپارچه، ذرات آلی و مواد مغذی محلول موجود در پساب توسط گونه‌هایی با سطوح تغذیه‌ای پایین‌تر جذب می‌شوند (Alexander و همکاران، ۲۰۱۶). این رویکرد به حذف تمام آلودگی‌های معدنی و آلی در پساب آبزی‌پروری کمک می‌کند. علاوه‌برآین، از این روش می‌توان در ترکیب با واحدهای تصفیه هوازی-بی‌هوازی استفاده کرد چراکه باعث کاهش هزینه، مصرف انرژی و همچنین، پایداری بیشتر آن‌ها می‌شود (Chopin، ۲۰۱۳).

تولید اکسیدان‌های طبیعی با استفاده از پساب آبزی‌پروری یکی از پیشرفت‌های نوآورانه‌ای است که در زمینه سیستم‌های آبزی‌پروری یکپارچه و چندمنظوره (IMTA) به‌دست آمده است. ساخت آنتی‌اکسیدان طبیعی برای درمان بیماری‌هایی مانند بیماری‌های قلبی، سرطان‌های خاص، آرتریت[۶]، پارکینسون، بیماری‌های گوارشی و بیماری آلزایمر ضروری است (Pham-Huy و همکاران، ۲۰۰۸). این نوع از آنتی‌اکسیدان‌ها نسبت به محصولات مصنوعی پایدارتر هستند. درشت جلبک‌ها به‌عنوان منبع مهمی از ترکیبات زیست‌فعال طبیعی در نظر گرفته می‌شوند (Olasehinde و همکاران، ۲۰۱۹؛ Elena-Suzana و همکاران، ۲۰۲۰). فعالیت آنتی‌اکسیدانی شناسایی شده در جلبک‌ها بیشتر شامل کلروفیل و مشتقات آن، کاروتنوئیدها، ویتأمین‌های E و C، فوکوزانتین (Wang و همکاران، ۲۰۱۸)، آنزیم‌ها، اسیدهای آمینه شبه مایکوسپورین، پلی‌ساکاریدها و پلی‌فنل‌ها است (Alghazwi و همکاران، ۲۰۱۹؛ Elena-Suzana همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از درشت جلبک‌ها برای استخراج ترکیبات، روشی پایدار و غیرسمی برای تولید آنتی‌اکسیدان‌ها است که به سادگی انجام می‌شود. ازاین‌رو، می‌توان درشت جلبک‌ها را با هزینه کم در سیستم‌های آبزی‌پروری یکپارچه و چندمنظوره (IMTA) کشت کرد (Guerrero و Cremades، ۲۰۱۲؛ Califano

و همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از جلبک‌ها به‌عنوان منبع ترکیبات آنتی‌اکسیدانی نیازمند بهره‌وری بالای زیست‌توده است. پساب‌های آبزی‌پروری منبع سرشار از نیتروژن و فسفات می‌باشند. از این استراتژی می‌توان برای تولید جلبک‌های پرورشی با هزینه کمتر استفاده کرد. از طرف دیگر، اثرات محیط‌زیستی منفی فعالیت‌های آبزی‌پروری را کاهش داد. جلبک‌های دریایی، به‌ویژه Ulva spp. و Gracilaria spp، به‌عنوان فیلترهای زیستی برای حذف نیتروژن معدنی محلول از پساب‌های آبزی‌پروری استفاده شده است (Chopin، ۲۰۱۳). زیست‌توده جلبکی تولید شده در سیستم‌های IMTA می‌تواند به‌عنوان غذا برای جانوران یا به‌عنوان منبع مواد با ارزش تجاری استفاده شود (Guerrero و Cremades، ۲۰۱۲). جلبک‌هایی که در پساب‌های سرشار از نیتروژن رشد می‌کنند، منبع خوبی از ترکیبات نیتروژن (N) هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به فیکوبیلی پروتئین‌ها که به‌عنوان نشانگرهای فلورسانس استفاده می‌شوند، اسیدهای آمینه شبه مایکوسپورین (MAAs)، یا ترکیبات فنولی که به‌عنوان مواد نمایشگر UV استفاده می‌شوند، اشاره کرد (Pagels و همکاران، ۲۰۱۹؛ Ramli و همکاران، ۲۰۲۰).

در پژوهش‌های Chopin (۲۰۱۳) و Burge و همکاران (۲۰۱۶)، کارایی جلبک‌های دریایی و دوکفه‌ای‌ها در تصفیه پساب میگو یا ماهی که یکی دیگر از سیستم‌های IMTA است، نشان داده شده است. صدف‌ها که به‌عنوان فیلترکننده‌های غیرانتخابی (به این معنا که همواره جدا از نوع ترکیبات موجود در آب، در حال فیلتر آن به درون بدن هستند) شناخته می‌شوند، به‌طور طبیعی می‌توانند مواد آلی را به‌صورت زیست‌توده در خود ذخیره کنند (Burge و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه‌برآن، برخی از تحقیقات از جمله Kerrigan و Suckling (۲۰۱۸) و Strand و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند عملکرد رشد دوکفه‌ای‌ها می‌تواند در سیستم‌های یکپارچه چندمنظوره بهبود یابد. علاوه‌برآن، بهره‌وری میگو نیز با حضور گونه‌های ثانویه افزایش می‌یابد که بیشتر به بهبود کیفیت آب نسبت داده می‌شود (Poli و همکاران، ۲۰۱۹).



شکل ۵- نمایی از یک سیستم آبزی‌پروری یکپارچه چندمنظوره (Chopin و همکاران، ۲۰۱۰)

بحث

امنیت منابع اساسی مانند آب، انرژی و غذا برای توسعه پایدار امری ضروری است. رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و تغییر الگوی مصرف باعث ایجاد فشار بر این منابع شده است. انتظار می‌رود در آینده نزدیک، در بسیاری از نقاط جهان، تقاضای جمعیت و دسترسی به نیازهای اولیه مانند غذا با چالش روبه‌رو شود. امروزه، صنعت آبزی‌پروری که به‌عنوان یکی از مشارکت‌کنندگان بزرگ تولید مواد غذایی در سراسر جهان شناخته می‌شود، با چالش‌های جدی روبه‌رو است که دسترسی به آب باکیفیت زیاد به‌عنوان یکی از مسائل اساسی در این صنعت به‌شمار می‌رود. این امر نیازمند پختگی فناوری‌های پایدار برای تصفیه پسماند آبزی‌پروری است. حفظ کیفیت مناسب آب برای تولید محصولات و علاوه‌برآن، کنترل اثرات سوء ناشی از پسماندهای آبزی‌پروری یک نیاز ضروری برای حفظ پایداری است. تاکنون، استفاده بیشتر از شیوه‌های غیرعلمی آبزی‌پروری منجر به هدر رفتن انرژی یا مصرف بیشتر انرژی شده است. در سیستم‌های معمولی، کیفیت آب را می‌توان از طریق جایگزینی پساب با آب تازه حفظ کرد. تحقق این هدف نیاز به تجهیزات گران‌قیمت برای تصفیه پساب ندارد و از دیدگاه اقتصادی ارزان است.

تصفیه پساب‌های آبزی‌پروری چالش بزرگی است که امروزه این صنعت مهم با آن روبه‌رو است. روش‌های گسترش یافته و همگانی برای تصفیه پساب، به گردش آب زیادی نیاز دارند. ازاین‌رو، در سناریوی کنونی به‌دلیل کمبود آب در بسیاری از نقاط جهان از جمله ایران، این روش به‌عنوان یک رویکرد پایدار مورد پذیرش نیست. سیستم آبزی‌پروری مدار بسته (RAS) که پساب را با حذف آلاینده‌های سمی و بازیافت آب، پالایش می‌کند، تنها به ۱۰ درصد از حجم کل آب شیرین برای تولید مقادیر زیاد ماهی نیاز دارد (Lin و همکاران، ۲۰۰۲). ازاین‌رو، این سیستم پایدارتر از روش‌های معمولی تصفیه است. اما بااین‌حال، سیستم مدار بسته محدودیت‌هایی مانند بارگیری هیدرولیکی کمتر و تجمع نیترات دارد که منجر به یوتریفیکاسیون و سمیت برای گونه‌های ماهی می‌شود. علاوه‌براین، هزینه بالای انرژی برای تأمین اکسیژن و حذف سمی بودن در سیستم‌های آبزی‌پروری مدار بسته، استفاده از این روش‌ها را از نظر اقتصادی غیرممکن ساخته است. علاوه‌بر تجمع نیترات در سیستم‌های مداربسته، محدودیت‌های دیگری نیز وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به نصب، راه‌اندازی و بهبود کارایی فیلترهای زیستی، پیشگیری و مبارزه با بیماری‌ها، حذف مواد جامد معلق در این سیستم و مدیریت سخت سیستم مدار بسته اشاره کرد.

تولید زیست‌توده جلبکی از پساب آبزیان یکی دیگر از فناوری‌های نوآورانه در بخش آبزی‌پروری است. از محدودیت‌های اصلی

فناوری سیستم‌های مدار بسته (RAS) می‌توان به هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری و نگهداری آن اشاره کرد که با تبدیل مواد مغذی به‌دست آمده از پساب آبزی‌پروری به زیست‌توده جلبکی می‌توان بر این محدودیت‌ها پیروز شد. در نهایت، سیستم ترکیبی و یکپارچه شامل استفاده از ارگانیسم‌های مکمل می‌باشد که می‌تواند به‌منظور بهینه‌سازی تعادل مواد مغذی و کاهش جامدات آلی در پساب و رسوبات مورد توجه قرار گیرد.

آکواپونیک یک سیستم هیدروپونیک است که از آبزی‌پروری برای رشد گیاهان استفاده می‌کند. این نوع از سیستم آبزی‌پروری به تولید کنندگان اجازه می‌دهد که گونه‌های آب شیرین و شور را با شرایط کنترل شده پرورش دهند. در سیستم‌های آکواپونیک، فضولات ماهی با استفاده از باکتری‌ها به مواد مغذی برای گونه‌های گیاهی و سبزیجات تبدیل می‌شوند. کل این فرآیند سازگار با محیط‌زیست است، در مصرف آب صرفه‌جویی می‌کند و پسماندی تولید نمی‌کند (Yavuzcan Yildiz و همکاران، ۲۰۱۷). برتری‌های محیط‌زیستی و اقتصادی این سیستم‌ها، مانند بهره‌وری آب، از عوامل مهم برای تولید پایدار است. یکی از برتری‌های اصلی آکواپونیک این است که این سیستم با مصرف آب تا ۱۰ برابر کمتر از کشاورزی سنتی، به بهره‌وری آب کمک می‌کند. این سیستم میزان هدر رفت آب را به‌حداقل می‌رساند و امکان استفاده مجدد از عناصر دیگر مانند مواد مغذی را فراهم می‌نماید (Rakocy، ۲۰۱۲). سامانه آکواپونیک مانند سایر سیستم‌های هیدروپونیک، نیازی به استفاده از مواد شیمیایی ندارد. استفاده نکردن از مواد شیمیایی نه تنها هزینه‌های ورودی را پایین نگه می‌دارد، بلکه برتری‌های محیط‌زیستی زیادی به همراه دارد و سلامت انسان را تأمین می‌کند. سیستم آکواپونیک اگرچه با بازدهی زیادی همراه است، اما کاستی‌هایی نیز دارد. راه‌اندازی سیستم‌های آکواپونیک می‌تواند گران باشد به‌طوری‌که امکانات زیرساختی برای این سیستم‌ها می‌تواند برخی از تولیدکنندگان را از سرمایه‌گذاری بازدارد (Marsh، ۲۰۲۰). هزینه اولیه راه‌اندازی یک سیستم آکواپونیک برای تولیدکنندگان متوسطی که به دنبال نصب سیستمی بزرگتر از مقیاس خانگی و کوچکتر از مقیاس تجاری هستند، کمی دشوار به‌نظر می‌رسد. عملیات تجاری بسته به نوع سیستم نصب شده می‌تواند از ۲۵۰۰۰ دلار تا بیش از ۱۰۰۰۰۰ دلار متغیر باشد (Marsh، ۲۰۲۰). یکی دیگر از کاستی‌های محدودیت‌های سیستم آکواپونیک، انتخاب گونه‌های لازم برای پرورش است. سیستم آکواپونیک برای پرورش تعداد بی‌شمار گونه ماهی و تعداد بی‌شمار نوع گیاه مناسب است (Graber و Junge، ۲۰۰۹)، اما محدوده انتخاب گونه‌ها برای این سیستم محدود است. اگرچه در سیستم‌های آکواپونیک، امکان پرورش گونه‌های آبزی آب شور و شیرین مانند تیلاپیا، کپور و باس وجود دارد، اما دامنه انتخاب گونه‌های گیاهی محدود است. این مسئله موجب محدودیت در سامانه‌های آکواپونیک شده است (Ravindranath، ۲۰۱۷؛ Travis، ۲۰۱۸).

سیستم آبزی‌پروری یکپارچه چندمنظوره (IMTA) از ارگانیسم‌های مختلف که سطوح غذایی گوناگونی را استفاده می‌کنند، تشکیل شده است. در این سیستم‌ها، کلیه مواد مغذی به‌واسطه ارگانیسم‌ها مصرف می‌شوند، بنابراین، امکان بروز آلودگی به حداقل می‌رسد. باتوجه‌به این مسئله، از آنجایی‌که سیستم‌های آبزی‌پروری چندمنظوره سازگار با محیط‌زیست می‌باشند (Khanjani و همکاران، ۲۰۲۲)، مدیریت آن‌ها در مقایسه با سیستم‌های قبلی به‌مراتب آسان‌تر است. در این سیستم‌ها میزان بهره‌وری آب و مواد مغذی به حداقل می‌رسد و انرژی زیادی برای راه‌اندازی سیستم نیاز نیست (Chopin، ۲۰۰۶).

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

در حال حاضر، آبزی‌پروری به‌عنوان یکی از بخش‌های رشد یافته تولید غذا در سراسر جهان، با مشکلات متعددی مانند خودآلودگی مواجه است. این مسئله موجب شده است که اثرات زیان‌آور پسماندهای به‌دست آمده از عملیات آبزی‌پروری بر محیط آبی در قالب بسیاری از مطالعات بررسی شود. کمتر از ۳۰ درصد مواد مغذی به‌دست آمده از خوراک می‌تواند توسط ماهی برای رشد استفاده شود، درحالی‌که مقدار باقیمانده به‌صورت ذرات آلی (خوراک مصرف نشده و مدفوع ماهی) و مواد مغذی معدنی (مدفوع ماهی) در آب رها می‌شود و باعث یوتریفیکاسیون، شکوفایی زیان‌آور جلبکی و اکسیژن‌زدایی آب می‌شود. نامطلوب شدن کیفیت آب، حیات زیست‌مندان در سیستم آبزی‌پروری را به خطر می‌اندازد و بیشتر منجر به بیماری و مرگ آبزیان مانند ماهیان می‌شود.

اهمیت مسئله آب در ایران باتوجه‌به موقعیت قرارگیری این کشور در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک مورد توجه لایه‌های مختلف جامعه، مسئولین و پژوهش‌گران جهانی قرار گرفته است. با نظر به رویکردهایی که جهت صرفه‌جویی آب در کشور به‌دست آمده است، لازم است از روش‌های آبزی‌پروری مدار بسته و از آن مهمتر، از سامانه‌های آکواپونیک و یکپارچه چندمنظوره به‌منظور پرورش آبزیان استفاده شود. انجام شدن این زمینه نیازمند همکاری دستگاه‌های دولتی و بخش خصوصی می‌باشد. بااین‌حال، ضروری است که پژوهش‌های بیشتری با هدف کاربرد روش‌های یاد شده در تولید و پرورش گونه‌های سرشناس آبزیان در کشور همچون ماهیان گرمابی (مانند کپور ماهیان پرورشی همچون کپور معمولی، کپور سرگنده، کپور نقره‌ای و کپور علف‌خوار) و سردابی (مانند آزاد ماهیان نظیر قزل‌آلای رنگین کمان) صورت گیرد.

پی‌نوشت

1-Eutrophication
2-Recirculatory Aquaculture System
3-Denitrifying biofilter
4-Biomass
5-Integrated Multi-Trophic Aquaculture
6-Arthritis

منابع

خدایی، ع.ا. ۱۳۹۵. رتبه هفدهم ایران در صنعت آبزی‌پروری جهان/ صنعت آبزی‌پروری ایران در رتبه نخست خاورمیانه. https://mana.ir (۱۰ مرداد ماه، ۱۴۰۱)

رادخواه ع. ر.، ایگدری س. و صادقی‌نژاد ماسوله، ا. ۱۳۹۹. بررسی خواص ضد میکروبی نانو ذرات نقره (AgNPs) به‌منظور کنترل بیماری‌ها و مدیریت بهداشت در سیستم‌های آبزی‌پروری. نشریه آبزیان زینتی، ۷(۱): ۷-۱۵.

رادخواه، ع. ر.، ایگدری، س. و صادقی‌نژاد ماسوله، ا. ۱۴۰۰. مروری بر فیلتراسیون غشایی و بررسی کارایی آن در بهبود کیفیت آب در سیستم‌های آبزی‌پروری مدار بسته (RAS). نشریه آب و توسعه پایدار، ۸(۳): ۸۱-۸۸.

رادخواه، ع.ر. و صادقی‌نژاد ماسوله، ا. ۱۴۰۰. بررسی تأثیر عوامل فیزیکوشیمیایی آب بر زیست‌فراهمی، میزان سمیت و سطح اثرگذاری نانوذرات فلزی در اکوسیستم‌های آبزی. نشریه آب و توسعه پایدار، ۸(۲): ۷۱-۹۰.

صالحی، ح. ۱۳۹۷. پیشرفت‌های صنعت شیلات ایران پس از انقلاب اسلامی. وزارت جهاد کشاورزی. https://www.maj.ir/page-Print/FA/0/printskin-dorsaetoolsenews/106641 (۱۵ بهمن ماه، ۱۳۹۷)

علیزاده، ر. ۱۴۰۱. چگونه نسبت آمونیوم به نیترات روی گیاهان تأثیر می‌گذارد؟ تجارت سبز آبان. https://abanagri.com (۶ مرداد ماه، ۱۴۰۱)

مرکز آمار ایران. ۱۴۰۱. تعداد مزارع تکثیر و پرورش آبزیان خوراکی کشور در سال ۱۴۰۰. https://www.amar.org.ir (۲۸ تیر ماه، ۱۴۰۱)

Abdel-Raouf N., Al-Homaidan A. A. and Ibraheem I.B.M. 2012. Microalgae and wastewater treatment. Saudi Journal of Biological Sciences, 19(3): 257-275.

Abu-Zeid M.A. 1998. Water and sustainable development: the vision for world water, life and the environment. Water Policy, 1(1): 9-19.

Alexander K.A., Angel D., Freeman S., Israel D., Johansen J. and Kletou D. 2016. Improving sustainability of aquaculture in Europe: Stakeholder dialogues on Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA). Environmental Science and Policy, 55: 96-106.

Alghazwi M., Smid S., Karpiniec S. and Zhang W. 2019. Comparative study on neuroprotective activities of fucoidans from Fucus vesiculosus and Undaria pinnatifida. International Journal of Biological Macromolecules, 122: 255-264.

Allen P.J. and Steeby J.A. 2011. Aquaculture: Challenges and Promise. Nature Education Knowledge, 3(10): 5-12.

Aquaculture ID. 2022. Recirculating aquaculture system. Aquaculture, 1(1): 6-16.

AWWA A. 2002. Nitrification. U.S. Environmental Protection Agency Office of Ground Water and Drinking Water Standards and Risk Management Division 1200 Pennsylvania Ave., NW Washington DC 20004. Economic and Engineering Services, 6: 70-100.

Banrie A. 2013. Algal toxins in pond aquaculture. The Fish Site, 1: 2-12.

Boudsocq S., Niboyet A., Lata J.C., Raynaud X., Loeuille N., Mathieu J., Blouin M., Abbadie L. and Barot S. 2012. Plant preference for ammonium versus nitrate: a neglected determinant of ecosystem functioning?. The American Naturalist, 180(1): 60-69.

Branyikova I., Prochazkova G., Potocar T., Jezkova Z. and Branyik T. 2018. Harvesting of Microalgae by Flocculation. Fermentation, 4(4): 93-107.

Brown J., Glenn E., Fitzsimmons K.M. and Smith S. 1999. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. Aquaculture, 75(3): 255-268.

Buhmann A. and Papenbrock J. 2013. Biofiltering of aquaculture effluents by halophytic plants: Basic principles, current uses and future perspectives. Environmental and Experimental Botany, 92: 122-133.

Burge C.A., Closek C.J., Friedman C.S., Groner M.L., Jenkins C.M., Shore-Maggio A. and Welsh J.E. 2016. The Use of Filter-feeders to Manage Disease in a Changing World, Integrative and Comparative Biology, 56(4): 573-587.

different proportions of straw pellets. Atmosphere, 12(11): 1380-1391.

Ekins P. and Zenghelis D. 2021. The costs and benefits of environmental sustainability. Sustainability Science, 16: 949–965.

Elena-Suzana B-D., Michiu D., Pop C.R., Rotar A.M., Tofana M., Pop O.L., Socaci S.A. and Farcas A.C. 2020. Macroalgae—A Sustainable Source of Chemical Compounds with Biological Activities. Nutrients, 12(10): 30-85.

FAO. 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in action. FAO Publishing. 1st Edition. Rome, Italy.

FAO. 2021. Food and Agriculture Organization: World review of fisheries and aquaculture. Fisheries Resources: Trends in Production, Utilization and Trade. FAO Publishing. 1st Edition. Rome, Italy.

FAO. 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Aquaculture, FAO Publishing. 3st Edition. Rome, Italy.

Graber A. and Junge R. 2009. Aquaponic systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination, 246: 147–156.

Growing Passion. 2022. Aquaponics: From fish poop to plant roots. EcoLife Conservation, 1: 1-12.

Guerrero S. and Cremades J. 2012. Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA): A sustainable, pioneering alternative for marine cultures in Galicia. HAL Archives, 1(1): 10-111.

Hofbauer W.K. 2021. Toxic or otherwise harmful algae and the built environment. Toxins (Basel), 13(7): 465. DOI: 10.3390/toxins13070465

Hudnell H.K. 2008. Cyanobacterial harmful algal blooms: State of the science and research needs. Springer International Publishing, 1st Edition. New York, USA.

IFAS. 2022. Center for Aquatic and Invasive Plants: Eichhornia crassipes (Water hyacinth). Plants, 2: 5-15.

IISD. 2022. International Institute for Sustainable Development (IISD). Sustainable Development, 1: 3-16.

Jardineria O. 2022. Helecho de agua (Azolla filiculoides). Plant Biology, 1: 5-12.

Califano G., Kwantes M., Abreu M.H., Costa R. and Wichard T. 2020. Cultivating the Macroalgal Holobiont: Effects of Integrated Multi-Trophic Aquaculture on the Microbiome of Ulva rigida (Chlorophyta). Frontiers in Marine Science, 12: 3-20.

Chopin T. 2006. Integrated multi-trophic aquaculture. What it is and why you should care and don't confuse it with polyculture. North Aquaculture, 12(4): 4-12.

Chopin T., Troell M., Reid G.K., Knowler D., Robinson S.M.C., Neori A., Buschmann A.H. and Pang S. 2010. Integrated multi-trophic aquaculture. Global Sea Food, 5: 1-14.

Chopin T. 2013. Aquaculture, Integrated Multi-Trophic (IMTA). In book: Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. Chapter: Aquaculture, Integrated Multi-Trophic (IMTA). Springer Publishing, Volume 1. 1st Edition. Amsterdam, Netherlands.

Correia M., Azevedo I.C., Peres H., Magalhães R., Oliva-Teles A., Ribeiro Almeida C.M. and Guimarães L. 2020. Integrated Multi-Trophic Aquaculture: A laboratory and hands-on experimental activity to promote environmental sustainability awareness and value of aquaculture products. Frontiers in Marine Science, 12: 150-170.

Dauda A.B. and Akinwole A.O. 2014. Interrelationships among water quality parameters in recirculating aquaculture system. NJRED, 8(4): 20-25.

Dauda A.B., Ajadi A., SusanTola-Fabunmi A.S. and Akinwole A.O. 2019. Waste production in aquaculture: Sources, components and managements in different culture systems. Aquaculture and Fisheries, 4(3): 81-88.

Dunwoody R.K. 2013. Aquaponics and hydroponics: the effects of nutrient source and hydroponic subsystem design on sweet basil production. Biology and Agriculture, 2: 20-220.

Dume B., Hanc A., Svehla P., Míchal P., Chane A.D. and Nigussie A. 2021. Carbon dioxide and methane emissions during the composting and vermicomposting of sewage sludge under the effect of

Martins C.I.M., Eding E.H., Verdegem M.C.J., Heinsbroek L.T.N., Schneider O., Blancheton J.P., Rogued Orbcaste E. and Verreth J.A.J. 2010. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: a perspective on environmental sustainability. Aquacultural Engineering, 43: 83-93.

Matter I.A., Bui V.K.H., Jung M., Seo J.Y., Kim Y-E., Lee Y-C. and Oh Y-K. 2019. Flocculation harvesting techniques for microalgae: A review. Applied Sciences, 9(15): 3069-3076.

Marsh J. 2020. Top pros and cons of aquaponics. Environment, 1(1): 2-11.

Mohebi Z. and Nazari M. 2021. Phytoremediation of wastewater using aquatic plants, A review. Journal of Applied Research in Water and Wastewater, 8(1): 50-58.

Moloantoa K.M., Khetsha Z.P., van Heerden E., Castillo J.C. and Cason E.D. 2022. Nitrate water contamination from industrial activities and complete denitrification as a remediation option. Water, 14(5):799.

Nagappan S., Das P., Abdul Quadir M., Thaher M., Khana S., Mahata C., Al-Jabri A., Vatland A.K. and Kumar G. 2021. Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture. Journal of Biotechnology, 341: 1-20.

Najjar Y.S.H. and Abu-Shamleh A. 2020. Harvesting of microalgae by centrifugation for biodiesel production: A review. Algal Research, 51: 102046.

NFDB A. 2022. Recent trends in aquaculture recirculatory aquaculture system (RAS). National Fisheries Development Board, 1: 1-12.

Nqombolo A., Mpupa A., Moutloali R. M. and Nomngongo P. 2018. Wastewater treatment using membrane technology: Wastewater and water quality. IntechOpen, 4: 20-50.

Olasehinde T.A., Olaniran A.O. and Okoh A.I. 2019. Macroalgae as a Valuable Source of Naturally Occurring Bioactive Compounds for the Treatment of Alzheimer's Disease. Marine drugs, 17(11): 609-620.

Omondi D.O. and Navalia A.C. 2020. Constructed wetlands in wastewater treatment and challenges of emerging resistant genes filtration and reloading. In-

Jusoh A., Nasir N.M., Yunos F.H.M., Jusoh H.H.W. and Lam S. 2020. Green technology in treating aquaculture wastewater. AIP Conference Proceedings, 2197: 1-13.

Kerrigan D. and Suckling C. 2018. A meta-analysis of integrated multi-trophic aquaculture: Extractive species growth is most successful within close proximity to open-water fish farms. Reviews in Aquaculture, 10(3): 560-572.

Khanjani M.H., Zahedi S. and Mohammadi A.R. 2022. Integrated multitrophic aquaculture (IMTA) as an environmentally friendly system for sustainable aquaculture: functionality, species, and application of biofloc technology (BFT). Environmental Science and Pollution Research, 9(2): 1-15.

Kim D-Y., Shinde S.K., Kadam A.A., Saratale R.G., Saratale G.D., Kumar M., Syed A., Bahkali A.H. and Ghodake G.S. 2022. Advantage of species diversification to facilitate sustainable development of aquaculture sector. Biology, 11(3): 368-380.

Kongkeo H. 2001. Current status and development trends of aquaculture in the Asian Region. Technical Proceedings of the Conference on Aquaculture in the Third Millennium. 1st Edition. Bangkok, Thailand.

Latour Marliac. 2022. Pistia Stratiotes (Water Lettuce). Plants, 2(1): 4-10.

Lin Y.F., Jing S.R., Lee D.Y. and Wang T.W. 2002. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. Aquaculture, 209: 169-184.

Maiga Y., von Sperling M. and Mihelcic J. 2017. Constructed wetlands. Michigan State University Publishing. 1st Edition. New York, USA.

Martinez-Espineira R., Chopin T., Robinson S., Noce A., Knowler D. and Yip W. 2015. Estimating the biomitigation benefits of integrated multi-trophic aquaculture: a contingent behavior analysis. Aquaculture, 437: 182-194.

Martinez-Porchas M. and Martinez-Cordova L.R. 2012. World aquaculture: Environmental impacts and troubleshooting alternatives. The Scientific World Journal, 38(3): 10-22.

oxygen concentrations. Applied and Environmental Microbiology, 66(11): 5013-5018.

Stathopoulou P., Berillis P., Levizou E., Sakellariou-Makrantonaki M., Kormas A.K., Aggelaki A., Kapsis P., Vlahos N. and Mente E. 2018. Aquaponics: a mutually beneficial relationship of fish, plants and bacteria. 3rd International Congress on Applied Ichthyology and Aquatic Environment. Volos, Greece.

Strand Ø., Jansen H.M., Jiang Z. and Robinson S.M.C. 2019. Perspectives on bivalves providing regulating services in integrated multi-trophic aquaculture. Springer Publishing, Volume 1, 1st Edition. Amsterdam, Netherlands.

Timmons M.B. and Lorsodo T.M. 1994. Aquaculture water reuse systems, engineering design and management. Volume 1. Elsevier Publishing. 1st Edition. New York, USA.

Tom A.P., Jayakumar J.S., Biju M., Somarajan J. and Ibrahim M.A. 2021. Aquaculture wastewater treatment technologies and their sustainability: A review. Energy Nexus, 4: 22-43.

Tossavainen M., Lahti K., Edelmann M. and Romantschuk M. 2019. Integrated utilization of microalgae cultured in aquaculture wastewater: wastewater treatment and production of valuable fatty acids and tocopherols. Journal of Applied Phycology, 31: 1753-1763.

Travis A. 2018. Aquaponics description, advantages and disadvantages. Farming Method, 5(1): 6-16.

Tyson R.V., Treadwell D.D. and Simonne E.H. 2011. Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. Hortechnology, 21: 6-13.

UNESCO. 2022. Sustainable Development. Available at: https://en.unesco.org/themes/education-sustainable-development/what-is-esd/sd (visited 10 May 2022)

Verdegem M.C.J., Bosma R.H. and Verreth J.A.J. 2006. Reducing water use for animal production through aquaculture. International Journal of Water Resources Development, 22(1): 101-113.

Waller. 2001. Tank culture and recirculating systems: Environmental impacts of aquaculture. Sheffield Academic Press, Volume 1. 1st Edition. Sheffield, UK.

techOpen, 5: 10-42.

Pagels F., Guedes A.C., Amaro H.M., Kijjoa A. and Vasconcelos V. 2019. Phycobiliproteins from Cyanobacteria: Chemistry and biotechno- logical applications. Biotechnology Advances, 37: 422-443.

Pelley J. 2016. Taming toxic algae blooms. ACS Central Science, 2(5): 270273. DOI: 10.1021/acscentsci.6b00129

Pham-Huy L.A., He H. and Pham-Huy C. 2008. Free radicals, antioxidants in disease and health. International Journal of Biomedical Science, 4(2): 89-96.

Poli M.A., Chamorro E., Marco L., Lorenzo A., Pinheiro I., Aranh M., Walter M., Seiffert Q. and Vieira F.N. 2019. Integrated multitrophic aquaculture applied to shrimp rearing in a biofloc system. Aquaculture, 511: 1-20.

Preena P.G., Kumar V.G.R. and Singh I.S.B. 2021. Nitrification and denitrification in recirculating aquaculture systems: the processes and players. Reviews in Aquaculture, 13(4): 2053-2075.

Rakocy J.E. 2012. Aquaponics-Integrating fish and plant culture: Aquaculture Production Systems. Wiley-Blackwell, 10(3): 344–386.

Ramli N.M., Verreth J., Yusoff F.M., Nurulhuda K., Nagao N. and Verdegem M. 2020. Integration of algae to improve nitrogenous waste management in recirculating aquaculture systems: A review. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 8: 1004. DOI: 10.3389/fbioe.2020.01004

Rosa J., Lemos M.F.L., Crespo D., Nunes M. and Letson S. 2020. Integrated multitrophic aquaculture systems – Potential risks for food safety. Trends in Food Science and Technology, 96: 79-90.

Ravindranath K. 2017. Aquaponics – an integrated fish and plant production system for urban, suburban and rural settings. NFDB Newsletter Matsya Bharat, 8(5): 5-15.

Sigalevich P., Baev M.V., Teske A. and Cohen Y. 2000. Sulfate reduction and possible aerobic metabolism of the sulfate-reducing bacterium Desulfovibrio oxyclinae in a chemostat coculture with Marinobacter sp. Strain MB under exposure to increasing

Gao S. and Shen Y. 2019. Bio-mitigation based on integrated multi-trophic aquaculture in temperate coastal waters: practice, assessment, and challenges. Latin American Journal of Aquatic Research, 47(2): 212-223. DOI: 10.3856/vol47-issue2-fulltext-1

Zheng C., Zhao L., Zhou X., Fu Z. and Li A. 2013. Treatment technologies for organic wastewater. IntechOpen, 4(1): 50-85.

Wang L., Park Y., Jeon Y. and Ryu B. 2018. Bioactivities of the edible brown seaweed, Undaria pinnatifida: A review. Aquaculture, 495: 873-880.

Yavuzcan Yildiz H., Robaina L., Pirhonen J., Mente E., Domínguez D. and Parisi G. 2017. Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review. Water, 9(1): 2-17. DOI: 10.3390/w9010013

Zhang J., Zhang S., Kitazawa D., Zhou J., Park S.,