



مقاله مروری:

مایکوسپورین‌ها و اسیدهای آمینه شبه‌مایکوسپورین (MAAs): کاربردها، فرصت‌ها و چشم‌اندازهای آینده در پرورش و سلامت آبزیان زینتی

رویا بدلی*^۱، فرح فرخی^۱، رامین مناف‌فر^۲، رضا روشندل^۲

*royabadali79@gmail.com

- ۱- گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 ۲- گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ پذیرش: بهمن ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: آذر ۱۴۰۴

چکیده

مایکوسپورین‌ها^۱ و اسیدهای آمینه شبه‌مایکوسپورین (MAAs)^۲ گروهی از متابولیت‌های ثانویه طبیعی هستند که در بسیاری از سیانوباکتری‌ها، جلبک‌ها، قارچ‌ها و سایر موجودات آبی یافت می‌شوند و به دلیل توانایی بالای جذب پرتوهای فرابنفش UV-A و UV-B، نقش مهمی در محافظت نوری ایفاء می‌کنند. این ترکیبات در کنار سایر متابولیت‌های زیست‌فعال سیانوباکتریایی (اسکیتونمین و فیکوبیلی پروتئین‌ها)، به عنوان مولکول‌هایی با ارزش زیستی بالا شناخته می‌شوند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که MAAs علاوه بر عملکرد محافظت در برابر تابش فرابنفش، دارای خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی، محافظت‌کننده سلولی و تعدیل‌کننده پاسخ به استرس‌های محیطی هستند. این ویژگی‌ها موجب شده است که MAAs به عنوان افزودنی‌های زیستی نوین در آبی‌پروری مورد توجه قرار گیرند. در صنعت آبزیان زینتی، افزایش تراکم نگهداری، جابه‌جایی، تغییرات کیفیت آب، استرس‌های محیطی و شیوع بیماری‌ها از مهم‌ترین عوامل محدودکننده سلامت و رفاه آبزیان محسوب می‌شوند. شواهد موجود نشان می‌دهد که MAAs می‌توانند با کاهش استرس اکسیداتیو، تقویت سامانه‌های دفاعی و افزایش مقاومت در برابر شرایط نامساعد محیطی، در بهبود سلامت و پایداری تولید آبزیان زینتی نقش مؤثری ایفاء کنند. در این مقاله مروری، ساختار شیمیایی، مسیرهای زیست‌ساخت، منابع تولید، روش‌های استخراج و ویژگی‌های زیستی MAAs بررسی شد و کاربردهای بالقوه آنها در تغذیه، سلامت، افزایش مقاومت به استرس و توسعه محصولات نوین برای صنعت آبزیان زینتی مورد بحث قرار گرفت. همچنین چالش‌ها، محدودیت‌ها و چشم‌اندازهای آینده پژوهش و تجاری‌سازی این ترکیبات در آبی‌پروری زینتی مرور گردید.

کلمات کلیدی: اسیدهای آمینه شبه‌مایکوسپورین (MAAs)، مایکوسپورین‌ها، آبی‌پروری زینتی، ماهیان زینتی، سلامت آبزیان، استرس

اکسیداتیو، سیانوباکتری‌ها

1- Mycosporines

2- Mycosporine-Like Amino Acids (MAAs)¹

2

مقدمه

در سال‌های اخیر، صنعت آبریزان زینتی به یکی از بخش‌های مهم آبرزی پروری جهان تبدیل شده است. ماهیان زینتی، بی‌مهرگان دریایی و سایر موجودات مورد استفاده در آکواریوم‌ها به دلیل شرایط خاص نگهداری (تراکم بالا، حمل‌ونقل مکرر، تغییرات کیفیت آب، نوردی مصنوعی و مواجهه با عوامل بیماری‌زا)، در معرض انواع استرس‌های فیزیولوژیک قرار دارند. این تنش‌ها معمولاً با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، تضعیف سیستم ایمنی و کاهش سلامت عمومی آبریزان همراه هستند. در چنین شرایطی، استفاده از ترکیبات زیست‌فعال طبیعی به عنوان افزودنی‌های خوراکی یا مکمل‌های سلامت‌محور مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. با توجه به ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی، محافظت‌کننده سلولی و نقش MAAs در سازگاری موجودات آبرزی با شرایط تنش‌زا، این ترکیبات به عنوان گزینه‌هایی امیدبخش برای توسعه راهکارهای نوین در تغذیه و مدیریت سلامت آبریزان زینتی مطرح شده‌اند (Carreto and Carignan, 2011; Rastogi et al., 2023; Peng et al., 2023).

به‌علاوه، اشعه‌های فرابنفش (UVC، UVB،UVA) بخشی از طیف الکترومغناطیسی خورشید هستند که اثرات متفاوتی بر موجودات زنده و محیط زیست دارند (Caetano et al., 2024). افزایش شدت تابش این پروتوها در سال‌های اخیر به دلیل تخریب لایه ازن، چالش‌های زیست‌محیطی و سلامتی متعددی را برای موجودات زنده ایجاد کرده است (Carreto and Carignan, 2011). فرابنفش رسیده به زمین است و می‌تواند به لایه‌های عمیق پوست نفوذ کند و باعث پیری زودرس و آسیب غیرمستقیم DNA شود (Caetano et al., 2024). UVB بر لایه سطحی پوست اثر می‌گذارد و عامل اصلی آفتاب سوختگی و سرطان پوست است (Wei et al., 2024). همچنین نور UVC به‌وسیله لایه ازن جذب می‌شود و به سطح زمین نمی‌رسد. در این میان، استفاده از ترکیبات طبیعی با قابلیت جذب UV به عنوان جایگزین فیلترهای شیمیایی سنتزی مورد توجه قرار گرفته است. ورود پروتوهای فرابنفش به سطح زمین و آبها منجر به بروز بیماری‌های گوناگون می‌شود. در این بین، موجودات دریایی بین جزر و مدی در بالاترین سطوح تابش فرابنفش قرار می‌گیرند. همین موضوع، اهمیت جست‌وجو برای ترکیبات محافظت‌کننده

طبیعی در برابر نور در موجودات مختلف را برجسته می‌کند تا بتوان آسیب‌های ناشی از UVR را کاهش داد (Hansson and Hylander, 2009; Neale et al., 2023). ماکروجلیک‌های دریایی که از آغاز پیدایش حیات روی زمین در معرض پرتوهای UV-A (315–400 nm) و UV-B (280–315 nm) بودند، سامانه‌های دفاعی گوناگونی را تکامل دادند (اجتناب از نور، ترمیم DNA و حفاظت سلولی در برابر UVR از طریق تولید کاروتنوئیدها و MAAs) (Singh et al., 2021). MAAs به دلیل خواص جذب اشعه ماوراء بنفش (UV) خود که در آن این ترکیبات می‌توانند رادیکال‌های آزاد خود را در ساختار حلقوی هسته خود جای دهند، به خوبی شناخته شده‌اند (Punchakara et al., 2023). از این‌رو، MAAs به عنوان جاذب رادیکال‌های شماره آزاد در نظر گرفته می‌شوند که می‌توانند ROS (گونه‌های فعال اکسیژن) را جذب کنند تا آسیب سلولی تولیدی در طول استرس اکسیداتیو را کاهش دهند (Kageyama and Waditee-Sirisattha, 2019). این ترکیبات به عنوان ترکیباتی زیست‌سازگار، غیرسمی و پایدار، نقش مهمی در استراتژی‌های دفاعی طبیعی جانداران آبرزی ایفاء می‌کنند و پتانسیل بالایی برای کاربردهای صنعتی دارند (Rastogi et al., 2023).

معرفی مایکوسپورین‌ها

مایکوسپورین‌ها و MAAs ترکیبات کم‌وزن مولکولی (معمولاً کمتر از ۴۰۰ دالتون) بی‌رنگ، محلول در آب و متشکل از یک کروموفور سیکلوهگزانون یا سیکلوهگزانیمن هستند (ساختار آنها شامل یکی از دو حلقه آمینوسیکلوهگزانون یا آمینوسیکلوهگزانیمن است) که با جانشین نیتروژنی یک آمینواسید یا الکل ایمنی آن پیوند خورده‌اند (Singh et al., 2023; Görünmek et al., 2024). مشتقات آمینوسیکلوهگزانون شامل یک حلقه سیکلوهگزانون هستند که با یک آمینواسید کونژوگه شده‌اند (مایکوسپورین-گلیسین و مایکوسپورین-تورین). در مقابل، آمینوسیکلوهگزانیمن دارای یک حلقه سیکلوهگزانیمن است که در کربن سوم آن یک گلیسین یا متیل‌آمین متصل شده است و در کربن اول، یک آمینواسید، آمینوآلکل یا کروموفور انامینون قرار دارد (Gerald et al., 2020). در برخی از این ترکیبات، پیوندهای گلیکوزیدی یا استرهای سولفات‌ها ممکن است در موقعیت‌های نیتروژنی

جاذب UVA در طبیعت محسوب می‌شوند و در برابر پرتوهای UVB نیز مؤثرند، امری که نقش بالقوه‌ی آنها را در محافظت نوری توضیح می‌دهد. علاوه بر نقش MAAs در توسعه تجاری محصولات ضدآفتاب برای محافظت از پوست، این ترکیبات می‌توانند به عنوان افزودنی‌های تثبیت‌کننده نوری در محافظت از مواد غیرزیستی (پلاستیک، رنگ و لاک) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Chen *et al.*, 2023; Urrea-victoria *et al.*, 2025).

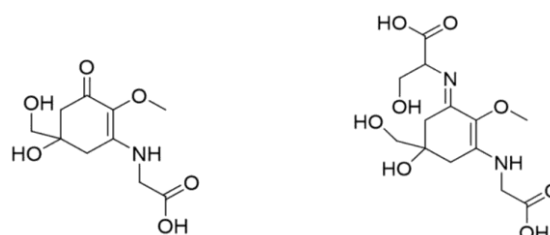
منابع قابل استخراج

MAAs در سیانوباکتری‌ها (Singh *et al.*, 2023)، فیتوپلانکتون‌ها (Llewellyn and Airs, 2010)، گل‌سنگ‌ها (Bonin *et al.*, 2024)، مرجان‌ها (van Oppen, 2024) و در بسیاری دیگر از موجودات دریایی مانند سایر نیداریان‌ها (Arbeloa *et al.*, 2010)، اسفنج‌ها (van Oppen, 2024)، میگوی آب شور (Görünmek *et al.*, 2024)، خارپشت‌های دریایی (Bonin *et al.*, 2024)، ستاره‌های دریایی (Goto-Inoue *et al.*, 1981)، صدف‌ها (Nakamura *et al.*, 2020)، آسیدیاها (Sensui and Hirose, 2018) و ماهی‌ها (Braun *et al.*, 2016) نیز یافت شده‌اند.

سیانوباکترها نیز به عنوان نخستین تولیدکنندگان این ترکیبات در محیط‌های پرتابش شناخته می‌شوند (Singh *et al.*, 2020). جلبک‌های دریایی به‌ویژه جلبک‌های قرمز^۱ یکی از غنی‌ترین منابع طبیعی MAAs محسوب می‌شوند (Chrapusta *et al.*, 2017). جلبک *Limnospira platensis* که در سالهای نه چندان دور با نام *Arthrospira platensis* شناخته می‌شد، غنی از ترکیبات زیستی فعالی مانند MAAs است که از قابلیت فعال‌سازی مسیر Keap1 Nrf2 pathway دفاعی در برابر استرس اکسیداتیو برخوردارند (Bandaranayake *et al.*, 2023).

Spirulina یک سیانوباکتری (جلبک سبز-آبی) میکروسکوپی، رشته‌ای، مارپیچی شکل و فاقد تمایز سلولی است که از توانایی رشد طبیعی در محیط‌های قلیایی و شور برخوردار است و می‌تواند هر ۲-۵ روز زیست‌توده خود را دو برابر کند (شکل ۲).

مشاهده شوند (Ishihara *et al.*, 2017). این گروه شامل ترکیباتی مانند پالیتین، شینورین، پورفیرا-۳۳۴، کاتلین و پورفیرا-۳۳۴ متصل به هگزوز است. تاکنون بیش از ۲۰ نوع MAA از موجودات مختلف شناسایی شده است (Geraldes and Pinto, 2021; Singh *et al.*, 2023).



(a)

(b)

شکل ۱: نمونه‌هایی از ساختار آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین (MAAs): (Geraldes and Pinto, 2021) (a) مایکوسپورین-گلیسین (اکسو-مایکوسپورین)، (b) شینورین (آمینو-مایکوسپورین)

MAAs دارای محدوده جذب حداکثری ۳۶۲-۲۶۸ نانومتر هستند که عمدتاً در بازه ۳۶۰-۳۱۰ نانومتر متمرکز است (Lawrence *et al.*, 2018). این محدوده جذب به دلیل وجود پیوندهای دوگانه مزدوج در ساختار مولکولی آنهاست که باعث ایجاد قله جذب می‌شود به طوری که ساختار سیکلوهگزانون در حدود ۳۱۰ نانومتر و ساختار سیکلوهگزیل‌آمین در حدود ۳۶۰ نانومتر قله جذب دارد (Llewellyn and Airs, 2010). این ترکیبات بر اساس ساختار شیمیایی به دو گروه اصلی مایکوسپورین‌های ساده و مایکوسپورین (آمینواسیدها) تقسیم می‌شوند (Carreto and Carignan, 2011).

مطالعات مولکولی نشان داده‌اند که مسیر بیوسنتز MAAs از متابولیسم shikimate منشأ می‌گیرد و آنزیم‌هایی نظیر O-methyltransferase و ATP-grasp ligase در این فرایند نقش کلیدی دارند (Bandaranayake *et al.*, 2023). MAAs از نظر فیزیکوشیمیایی دارای پایداری نوری بالا هستند و انرژی UV جذب‌شده را بدون تولید رادیکال آزاد به گرما تبدیل می‌کنند (Rastogi *et al.*, 2023). این ترکیبات دارای ضریب جذب مولی بسیار بالا هستند (ε = 12,400-58,800 M⁻¹·cm⁻¹) به دلیل این ویژگی‌ها، MAAs قوی‌ترین ترکیبات

¹ Rhodophyta

نقش داشته باشند (Kageyama and Waditee-Sirisattha, 2019; Rastogi *et al.*, 2023). از آنجایی که MAAs دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی و محافظت‌کننده سلولی هستند، این احتمال وجود دارد که بتوانند در کاهش پیامدهای عصبی ناشی از استرس‌های محیطی در آبزیان نیز نقش ایفاء کنند. هرچند تاکنون مطالعات مستقیمی در خصوص اثر MAAs بر عملکرد عصبی ماهیان زینتی انجام نشده است، اما نتایج حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی نظیر زبرافیش می‌تواند مبنایی برای طراحی پژوهش‌های آینده در زمینه سلامت عصبی، بهبود سازگاری با شرایط پرورشی و افزایش رفاه آبزیان زینتی باشد. در سال‌های اخیر توجه به مفهوم رفاه آبزیان^۳ در صنعت ماهیان زینتی افزایش یافته است. در این چارچوب، شناسایی ترکیبات طبیعی که بتوانند پاسخ آبزیان به استرس‌های محیطی را تعدیل کنند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین، بررسی نقش احتمالی MAAs در حفاظت از سیستم عصبی و کاهش اثرات تنش‌های مزمن می‌تواند یکی از حوزه‌های پژوهشی نوظهور در آبی‌پروری زینتی محسوب شود.

با توجه به یافته‌های پیشین درباره اثرات محافظتی *Spirulina* (Kumar *et al.*, 2024; Tamtaji *et al.*, 2023; Tavares *et al.*, 2024) و فعالیت‌های زیستی و ترمیم ترکیبات MAA (Sara *et al.*, 2022)، هنوز یک شکاف دانشی مهم وجود دارد. در این میان اغلب مطالعات انجام‌شده اثرات *Spirulina* را به صورت کلی بررسی کرده‌اند و تاکنون تأثیر اختصاصی MAAs استخراجی از *Spirulina* بر مدل آلزایمر در زبرافیش تاکنون بررسی نشده است. روشن‌سازی این موضوع می‌تواند دیدگاه تازه‌ای نسبت به کاربرد ترکیبات طبیعی در پیشگیری یا درمان بیماری‌های نورودژنراتیو ارائه دهد.

کاربرد مایکوسپورین‌ها در شیلات و آبی‌پروری

اشعه فرابنفش فعال‌ترین بخش فوتوشیمیایی از تابش خورشیدی است. با وجود جذب بالای آن در محیط‌های آبی، اثرات بیوشیمیایی، ژنتیکی و سیتوتوکسیک متعددی بر موجودات آبی ایجاد می‌کند. برای مقابله با استرس ناشی از UVR، بسیاری از گونه‌ها قادرند ترکیبات ضدآفتاب طبیعی را سنتز، تجمع یا از طریق رژیم غذایی خود کسب کنند تا از خود در برابر نور محافظت کنند (Sara *et al.*, 2022).



شکل ۲: موفولوژی جلبک *Limnospira platensis*

اصطلاح *Spirulina* در سال‌های پیش عمدتاً برای توصیف دو گونه از سیانوباکتری‌ها به کار می‌رفت (*Arthrospira* و *platensis* (Sinha *et al.*, 2018) *A. maxima*). *Spirulina* که در بسیاری از کشورها به عنوان تغذیه انسان و حیوانات به صورت تجاری کشت داده می‌شود، منبعی غنی از پروتئین و ویتامین‌ها است (Hooti and Manaffar, 2022). *Spirulina* منبع غنی PCB^۱ است، ترکیبی که به عنوان مهارکننده آنزیم NADPH اکسیداز شناخته می‌شود، آنزیمی که نقش مهمی در ایجاد استرس اکسیداتیو در بسیاری از بیماری‌های عصبی و NDs مثل آلزایمر دارد (Kim *et al.*, 2018).

کاربردهای مختلف مایکوسپورین‌ها

MAAs در سلامت عصبی و کاربردهای پژوهشی در

زبرافیش

بیماری‌های NDs^۲ به عنوان یکی از چالش‌های مهم در جامعه شناخته می‌شوند. بر همین اساس اخیراً پژوهشگران بسیاری بر توسعه ترکیبات زیست‌فعال طبیعی (*Spirulina*)، برای درمان بیماری‌های NDs تمرکز کرده‌اند (Kim *et al.*, 2018). تحقیقات نشان داده است در میان ترکیبات زیست‌فعال *Spirulina*، MAAs به دلیل ساختارهای حلقوی پایدار، توانایی جذب اشعه فرابنفش، و مهار رادیکال‌های آزاد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (Sara *et al.*, 2022).

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که استرس اکسیداتیو یکی از مهم‌ترین عوامل آسیب سلولی در بافت عصبی است و ترکیبات دارای خاصیت آنتی‌اکسیدانی می‌توانند در کاهش این آسیب‌ها

^۱ Phycocyanobilin (PCB)

^۲ Neurodegenerative Diseases (NDs)

^۳ Aquatic Animal Welfare

گیرند. مطالعات نشان داده‌اند که MAAs قادر به مهار گونه‌های فعال اکسیژن، کاهش آسیب‌های اکسیداتیو و محافظت از سلول‌ها در برابر تنش‌های محیطی هستند (Kageyama and Waditee-Sirisattha, 2019; Rastogi *et al.*, 2023). از این‌رو، انتظار می‌رود استفاده از این ترکیبات در جیره غذایی آبزیان زینتی بتواند موجب بهبود وضعیت فیزیولوژیک، افزایش مقاومت در برابر تنش و ارتقاء سلامت عمومی آبزیان شود (Carreto and Carignan, 2011; Peng *et al.*, 2023). یکی دیگر از زمینه‌های مهم کاربرد MAAs، استفاده از آنها در دوره‌های قبل از حمل‌ونقل است. حمل‌ونقل یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد استرس در ماهیان زینتی محسوب می‌شود و معمولاً با افزایش استرس اکسیداتیو، کاهش پاسخ ایمنی و افت کیفیت ظاهری همراه است. به دلیل توانایی MAAs در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و محافظت سلولی، استفاده از آنها در خوراک‌های آماده‌سازی پیش از حمل‌ونقل می‌تواند به کاهش اثرات منفی این فرایند کمک کند (Kageyama and Waditee-Sirisattha, 2019; Rastogi *et al.*, 2023).

علاوه‌براین، MAAs به عنوان فیلترهای زیستی طبیعی فرابنفش شناخته می‌شوند و در بسیاری از جانداران دریایی نقش محافظتی در برابر آسیب‌های ناشی از تابش UV ایفاء می‌کنند (Singh *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2023). مطالعات انجام‌شده بر ماهیان دریایی نشان داده است که ترکیبات جذب‌کننده UV می‌توانند در مدت کوتاهی در بافت‌ها تجمع یافته و به افزایش مقاومت در برابر تنش‌های نوری کمک کنند (Braun *et al.*, 2016). بنابراین، استفاده از منابع غنی از MAAs در جیره غذایی آبزیان زینتی می‌تواند به تقویت مکانیسم‌های طبیعی دفاعی در برابر تنش‌های نوری منجر شود. یکی دیگر از جنبه‌های بالقوه کاربرد MAAs در صنعت آبزیان زینتی، حفظ کیفیت رنگ‌آمیزی و سلامت پوست است. رنگ‌آمیزی مناسب یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزش اقتصادی ماهیان زینتی محسوب می‌شود و استرس اکسیداتیو می‌تواند موجب تخریب رنگدانه‌ها و کاهش کیفیت ظاهری گردد. اگرچه تاکنون نقش مستقیم MAAs در رنگدانه‌سازی به طور کامل مشخص نشده است، اما خواص آنتی‌اکسیدانی و محافظت سلولی آنها می‌تواند در حفظ سلامت کروماتوفورها و پایداری رنگ بدن مؤثر باشد (Kageyama and Waditee-Sirisattha, 2019; Rastogi *et al.*, 2023). علاوه بر ماهیان زینتی، بسیاری از

بسیاری از گروه‌های موجودات زنده مانند ماکرو جلبک‌ها، ریز جلبک‌ها، باکتری‌های هتروتروف دریایی و سایر موجودات دریایی مختلف اسیده‌های آمینه شبه مایکوسپورین تولید می‌کنند که در برخی از فرایندهای بقاء و مکانیسم‌های دفاعی آنها در برابر استرس نقش دارند. آنها در برخی گونه‌ها به عنوان مخزن نیترژن درون سلولی نیز عمل می‌کنند. در موجودات آبی مانند جلبک‌ها و سایر موجودات دریایی، این مولکول‌های زیستی در محافظت در برابر تشعشعات مضر خورشیدی نقش دارند (Bhatia *et al.*, 2011). اسیده‌های آمینه شبه مایکوسپورین نه تنها به دلیل فعالیت‌های محافظت نوری در ریزجلبک‌ها شناخته شده‌اند بلکه با تنظیم تعادل اسمزی در محافظت از آنها در برابر تنش شوری نیز نقش دارند (Peng *et al.*, 2023). افزودن MAAs به جیره غذایی آبزیان می‌تواند موجب افزایش تجمع این ترکیبات در بافت‌های سطحی و ایجاد یک سپر زیستی در برابر تابش فرابنفش و افزایش مقاومت آنها در برابر استرس نوری می‌شود که در نهایت به کاهش آسیب‌های DNA و بهبود یکپارچگی بافتی منجر می‌گردد (Carreto and Carignan, 2011). همچنین گزارش شده است که غنی‌سازی خوراک با منابع حاوی MAAs می‌تواند با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی و کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن، شاخص‌های رشد و کارایی تغذیه‌ای را در شرایط تنش محیطی بهبود بخشد. همچنین این ترکیبات با کاهش استرس اکسیداتیو، باعث بهبود بقاء و رشد لاروها در سیستم‌های پرورش متراکم می‌شوند (Rastogi *et al.*, 2023).

پتانسیل کاربرد MAAs در صنعت آبزیان زینتی

صنعت آبزیان زینتی با چالش‌های متعددی از جمله تراکم بالای نگهداری، حمل‌ونقل طولانی مدت، تغییرات کیفیت آب، استرس ناشی از نور مصنوعی، جابه‌جایی مکرر و شیوع بیماری‌های فرصت طلب مواجه است. این عوامل معمولاً با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، آسیب‌های اکسیداتیو و تضعیف سیستم ایمنی همراه هستند که در نهایت موجب کاهش بقاء، افت کیفیت ظاهری و افزایش تلفات اقتصادی می‌شوند (Neale *et al.*, 2023; Peng *et al.*, 2023). با توجه به خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی و محافظت‌کننده سلولی MAAs، این ترکیبات می‌توانند به عنوان نسل جدیدی از افزودنی‌های عملکردی در جیره آبزیان زینتی مورد استفاده قرار

می‌تواند پایداری رنگ و کیفیت حسی را در طول نگهداری افزایش دهد (Torres *et al.*, 2018). به‌علاوه، به دلیل منشا طبیعی و زیست‌سازگاری بالا، این ترکیبات گزینه‌ای ایمن برای توسعه افزودنی‌های غذایی نوین با رویکرد برچسب پاک محسوب می‌شوند (Carreto and Carignan, 2011).

کاربرد در محصولات بهداشتی

قرارگرفتن مزمن در معرض اشعه ماوراءبنفش، باعث ایجاد تغییراتی در ساختار پوست انسان می‌شود که با آن پیری ناشی از نور می‌گویند و شامل نازک شدن لایه اپیدرم، افزایش تعداد ملانوسیت‌ها، تجمع شدید الیاف الاستیک تخریب شده و کوتاه شده در درم، کاهش تعداد رشته‌های کلاژن و حضور سلول‌های التهابی در درم می‌شود. این فرایندها در نهایت منجر به تغییرات قابل توجهی در سطح بیان ژن‌های مرتبط با پیری ناشی از نور می‌شود. برای مثال، قرار گرفتن در معرض اشعه UV به طور چشمگیری روند پیری پوست را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بدین صورت که باعث تخریب کلاژن (یکی از عوامل اصلی حفظ نرمی و انعطاف‌پذیری پوست)، می‌شود و میزان الاستین موجود در ماتریکس خارج‌سلولی (مولکولی متصل‌شونده به کلاژن) را کاهش می‌دهد (Siiskonen *et al.*, 2018).

در سال‌های اخیر، MAAs به دلیل ویژگی‌های طبیعی محافظت نوری و آنتی‌اکسیدانی، توجه زیادی را در محصولات مراقبت از پوست به خود جلب کرده‌اند (Urrea-Victoria *et al.*, 2025). یکی از مهم‌ترین کاربردهای تجاری MAAs استفاده از آنها به عنوان عامل محافظت نوری در برابر UV در محصولات ضد آفتاب است (Suh *et al.*, 2017). این ترکیبات علاوه بر محافظت نوری، دارای خواص ضدالتهابی و ضدپیری هستند که آنها را برای فرمولاسیون کرم‌های مراقبت از پوست مناسب می‌سازد (Rastogi *et al.*, 2023). MAAs قوی‌ترین ترکیبات جاذب UVA در طبیعت محسوب می‌شوند و در برابر پرتوهای UVB نیز مؤثرند، امری که نقش بالقوه‌ی آنها را در محافظت نوری توضیح می‌دهد. علاوه بر نقش MAAs در توسعه تجاری محصولات ضدآفتاب برای محافظت از پوست، این ترکیبات می‌توانند به عنوان افزودنی‌های تثبیت‌کننده نوری در محافظت از مواد غیرزیستی (پلاستیک، رنگ و لاک) نیز مورد استفاده قرار گیرند (Chen *et al.*, 2023; Urrea-victoria *et al.*, 2025). بررسی اختراعاتی ثبت شده اخیر نشان می‌دهد که استفاده از

بی‌مهرگان مورد استفاده در آکواریوم‌های آب شور (مرجان‌ها، شقایق‌های دریایی و سایر نیداریان‌ها) نیز به طور طبیعی حاوی MAAs هستند یا این ترکیبات را از همزیستان فتوسنتزکننده خود دریافت می‌کنند (Arbeloa *et al.*, 2010; van Oppen, 2024). بنابراین، غنی‌سازی خوراک یا توسعه مکمل‌های حاوی MAAs می‌تواند راهکاری نوین برای افزایش مقاومت این موجودات در برابر تنش‌های محیطی و شرایط مصنوعی آکواریومی باشد.

در مجموع، MAAs را می‌توان از امیدبخش‌ترین ترکیبات زیست‌فعال برای توسعه خوراکی‌های عملکردی، مکمل‌های ضد استرس و راهکارهای نوین مدیریت سلامت در صنعت آبیاری زینتی دانست. با این حال، تعیین دوز بهینه، قابلیت هضم، فراهمی زیستی و اثرات بلندمدت این ترکیبات در گونه‌های مختلف آبیاری زینتی نیازمند انجام مطالعات تجربی بیشتر است (Carreto and Carignan, 2011; Peng *et al.*, 2023;) (Görünmek *et al.*, 2024).

کاربرد به عنوان مکمل غذایی

MAAs با توانایی جذب قوی اشعه فرابنفش، به عنوان افزودنی‌های طبیعی برای افزایش پایداری نوری مواد غذایی حساس به نور مورد توجه قرار گرفته‌اند و باعث کاهش تخریب ترکیبات زیست‌فعال می‌شوند (Rastogi *et al.*, 2023; Yamamoto *et al.*, 2024). این ترکیبات با داشتن خاصیت آنتی‌اکسیدانی قادرند از اکسیداسیون چربی‌ها، رنگدانه‌ها و ویتامین‌ها در فرآورده‌های غذایی جلوگیری کنند و ماندگاری محصول را افزایش دهند (Torres *et al.*, 2018). همچنین استفاده از MAAs به عنوان نگهدارنده طبیعی می‌تواند جایگزین مناسبی برای آنتی‌اکسیدان‌ها و پایدارکننده‌های سنتزی در غذاهای فراسودمند و نوشیدنی‌ها باشد (Carreto and Carignan, 2011). علاوه بر این، به‌کارگیری این ترکیبات در بسته‌بندی‌های فعال و پوشش‌های خوراکی به منظور محافظت از مواد غذایی در برابر تخریب ناشی از نور، به عنوان رویکردی نوین در صنایع غذایی مطرح شده است (Torres *et al.*, 2018). این ترکیبات به دلیل پایداری حرارتی و شیمیایی بالا می‌توانند در فرایندهای مختلف صنایع غذایی بدون کاهش معنی‌دار فعالیت زیستی مورد استفاده قرار گیرند (Carreto and Carignan, 2011). مطالعات نشان داده است که افزودن عصاره‌های غنی از MAAs به فرآورده‌های دریایی و محصولات بر پایه جلبک

گسترش دانش درباره پروتئین‌های $A\beta$ و Tau شده است (Xia., 2010).

MAAs در محصولات آرایشی در حال افزایش است (Suh et al., 2017).

چالش‌ها و چشم‌انداز آینده

چالش اصلی در کاربرد صنعتی MAAs در صنایع شیلات، غذایی و آرایشی بهداشتی، محدودیت در تولید انبوه و وابستگی میزان سنتز این ترکیبات به شرایط محیطی (شدت نور، فصل و گونه‌های تولید کننده)، است (Carreto and Carignan, 2011). همچنین فقدان مطالعات کافی درباره ایمنی بلندمدت و پایداری این ترکیبات در فرمولاسیون‌های صنعتی از دیگر چالش‌های مهم تجاری‌سازی MAAs محسوب می‌شود (Yamamoto et al., 2024). غلظت طبیعی پایین MAAs در منابع زیستی یکی از محدودیت‌های اصلی تولید صنعتی آنها محسوب می‌شود (Bandaranayake et al., 2023). در نتیجه، توسعه روش‌های زیست‌فناوری (بیان هترولوگ ژن‌های بیوسنتزی در میکروارگانیسم‌ها)، به عنوان راهکاری نوین پیشنهاد شده است (Rastogi et al., 2023).

نتیجه‌گیری

MAAs ترکیبات طبیعی با خاصیت جذب UV و آنتی‌اکسیدانی هستند که نقش حفاظتی مهمی در موجودات دریایی دارند و به همین دلیل توجه زیادی در پژوهش‌های کاربردی پیدا کرده‌اند. این ترکیبات در صنایع شیلات می‌توانند در افزایش مقاومت استرس نوری و بهبود سلامت آبزیان موثر باشند و به ارتقاء کیفیت پرورش کمک کنند. همچنین در صنایع غذایی به عنوان آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی، پتانسیل استفاده به عنوان جایگزین افزودنی‌های سنتزی افزایش ماندگاری محصولات مطرح هستند و در صنایع آرایشی و بهداشتی، MAAs به دلیل ایمنی بالا و توانایی محافظت در برابر UV، گزینه‌ای ارزشمند برای توسعه ضدآفتاب‌های زیست‌سازگار محسوب می‌شوند. به طور کلی، MAAs از پتانسیل بالایی برای استفاده در محصولات پایدار و طبیعی به‌خصوص در مکمل‌های غذایی آبزیان زینتی که نسب به شرایط پرورش و حمل و نقل حساس‌تر هستند، برخوردارند.

تحقیقات در علوم زیستی

تحقیق بر MAAs می‌تواند بسیاری از بیماری‌های قرن اخیر را رفع نماید. در این میان مدل‌هایی مانند زبرا فیش (Danio rerio)، ارزش بالایی در تحقیقات مولکولی و عصب‌شناسی دارند که می‌توانند پاسخ‌های جالبی به MAAs را در سطح بیوشیمیایی و مولکولی از خود نشان دهند که قابل تعمیم به انسان‌ها نیز هست (Meşeli et al., 2025). یک گونه ماهی کوچک از سرده Danio در خانواده Cyprinidae و راسته Cypriniformes است و به عنوان یکی از مهم‌ترین جانوران مدل در تحقیقات ژنتیکی و زیست‌شناسی توسعه شناخته می‌شود (McCluskey and Postlethwait, 2015) و به دلیل گران بودن مدل‌های حیوانی پستانداران، سیستم زبرافیش برای فراهم آوردن ارزیابی آزمایشگاهی و مدل‌سازی بدن پستانداران، شانس بالاتر و بیش‌تری نسبت به سایر مدل‌ها دارد (Bazrafshan et al., 2015). در سال‌های اخیر استفاده از زبرافیش به عنوان یک مدل مورد علاقه برای بیماری‌های DNS در حال ظهور است، زیرا سیستم عصبی ساده، ژنوم بسیار محافظت‌شده و از مدت زمان کوتاه لازم برای مدل‌سازی شرایط بیماری برخوردار است (Dhiman et al., 2025). زبرافیش دارای ژن‌هایی است که همولوگ ژن‌هایی هستند که در آلزایمر خانوادگی دچار جهش می‌شوند و تحقیقات با استفاده از زبرافیش ویژگی‌های منحصر به فرد این ژن‌ها را نشان داده است که در مدل‌های جوندگان به سختی قابل مشاهده بودند. زبرافیش به طور فزاینده‌ای به عنوان مدل تحقیقاتی بیماری آلزایمر محبوبیت پیدا می‌کند و مطالعات انجام شده با آن می‌تواند مطالعات انجام شده با سایر مدل‌ها را تکمیل کرده و به درک کامل‌تر ما از این بیماری کمک کند (Newman et al., 2014).

پلاک‌های نوریتی حاوی پروتئین $A\beta^1$ و NFT² حاوی Tau فسفریله‌شده بیش از حد، دو ویژگی ثابت بیماری آلزایمر (AD) هستند. استفاده از زبرافیش به عنوان یک مدل برای تحقیقات آلزایمر به‌خصوص زمانی که با MAAs تیمار شده باشند، موجب

¹ Amyloid beta ($A\beta$)

² Neurofibrillary Tangles (NFT)

منابع

- Caetano, M., Gregório, J. and Paulo, M.S., 2024.** Analyzing the Reliability and Cost of the Most Commonly Used Dosimeters for Personal Ultraviolet Radiation Monitoring—A Rapid Review. *Atmosphere*, 15(12), 1531. <https://doi.org/10.3390/atmos15121531>
- Carreto, J.I. and Carignan, M.O., 2011.** Mycosporine-like amino acids: relevant secondary metabolites. Chemical and ecological aspects. *Marine Drugs*, 9(3):387–446. <https://doi.org/10.3390/md9030387>
- Chen, M., Jiang, Y. and Ding, Y., 2023.** Recent progress in unraveling the biosynthesis of natural sunscreens mycosporine-like amino acids. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 50(1), kuad038. <https://doi.org/10.1093/jimb/kuad038>
- Chrapusta, E., Kaminski, A., Duchnik, K., Bober, B. and Adamski, M., 2017.** Mycosporine-like amino acids: Potential health and beauty ingredients. *Marine Drugs*, 15(10), 326. <https://doi.org/10.3390/md15100326>
- Dhiman, N., Deshwal, S., Rishi, V., Singhal, N.K. and Sandhir, R., 2025.** Zebrafish as a model organism to study sporadic Alzheimer's disease: Behavioural, biochemical and histological validation. *Experimental Neurology*, 383:115034. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2025.115034>
- Geraldes, V., Medeiros, L.S.D., Lima, S.T., Alvarenga, D.O., Gacesa, R., Long, P.F., Fiore, M.F., Pinto, E., Stella, T.L. and Paul, F., 2020.** Genetic and biochemical evidence for redundant pathways leading to mycosporine-like amino acid biosynthesis in the cyanobacterium *Sphaerospermopsis torques-reginae* ITP-024. *Algae*, 35(2), pp. 177-187. <https://doi.org/10.4490/algae.2020.35.5.19>
- Arbeloa, E.M., Carignan, M.O., Acuña, F.H., Churio, M.S. and Carreto, J.I., 2010.** Mycosporine-like amino acid content in the sea anemones *Aulactinia marplatensis*, *Oulactis muscosa* and *Anthothoe chilensis*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, 156:216–221. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2010.04.002>
- Bandaranayake, W.M., Des Rocher, A. and Shick, J.M., 2023.** Unraveling the molecular basis of mycosporine biosynthesis in fungi. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(7):6421. <https://doi.org/10.3390/ijms24076421>
- Bazrafshan, B., Sadeghi, H., Khalili, M. and Hosseini-Far, H., 2015.** Application of Zebrafish (*Danio rerio*) as a research model. *Journal of Ornamental Aquatics*, 2(3):9-13. (in Persian). <http://ornamentalaquatics.ir/article-1-55-en.pdf>
- Bhatia, S., Sharma, K., Sharma, A., Garg, A., Kumar, S. and Purohit, A., 2011.** Mycosporine and mycosporine-like amino acids: A paramount tool against ultraviolet irradiation. *Pharmacognosy Reviews*, 5:138–146. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.91107>
- Bonin, J., Hammerle, F. J., Ganzera, M., Krumme, U. and Karsten, U., 2024.** UV-absorbing mycosporine-like amino acids in the eyes of temperate marine and freshwater fish species. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1426861. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1426861>
- Braun, C., Reef, R. and Siebeck, U.E., 2016.** Ultraviolet absorbing compounds provide a rapid response mechanism for UV protection in some reef fish. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 160, 400-407.

- Geraldes, V. and Pinto, E., 2021.** Mycosporine-like amino acids (MAAs): Biology, chemistry and identification features. *Pharmaceuticals*, 14(1):63. <https://doi.org/10.3390/ph14010063>
- Görünmek, M., Ballık, B., Cakmak, Z. E. and Cakmak, T., 2024.** Mycosporine-like amino acids in microalgae and cyanobacteria: Biosynthesis, diversity, and applications in biotechnology. *Algal Research*, 80, 103507. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103507>
- Goto-Inoue, N., Sato, T., Morisasa, M., Yamashita, H., Maruyama, T., Ikeda, H. and Sakai, R., 2020.** Mass spectrometry imaging reveals differential localization of natural sunscreens in the mantle of the giant clam *Tridacna crocea*. *Scientific reports*, 10(1), 656. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57629-7>
- Hansson, L.A. and Hylander, S., 2009.** Effects of ultraviolet radiation on pigmentation, photoenzymatic repair, behavior, and community ecology of zooplankton. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 8(9): 1266-1275. <https://doi.org/10.1039/B901491C>
- Hooti, V. and Manaffar, R., 2022.** *Spirulina*: The Food of the Future. Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran. *Journal of Ornamental Aquatics*, 10, 2., pp.1-13. <https://doi.org/20.1001.1.24234575.1402.10.2.1.1> (in Persian).
- Ishihara, K., Watanabe, R., Uchida, H., Suzuki, T., Yamashita, M., Takenaka, H., Nazifi, E., Matsugo, S., Yamaba, M. and Sakamoto, T., 2017.** Novel glycosylated mycosporine-like amino acid, 13-O-(β -galactosyl)-porphyra-334, from the edible cyanobacterium *Nostoc sphaericum*-protective activity on human keratinocytes from UV light. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 172, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.05.016>
- Kageyama, H. and Waditee-Sirisattha, R., 2019.** Antioxidative, anti-inflammatory, and anti-aging properties of mycosporine-like amino acids: molecular and cellular mechanisms in the protection of skin-aging. *Marine Drugs*, 17:222. <https://doi.org/10.3390/md17040222>
- Kim, K.M., Lee, J. Y., Im, A.R. and Chae, S., 2018.** Phycocyanin protects against UVB-induced apoptosis through the PKC α/β II-Nrf-2/HO-1 dependent pathway in human primary skin cells. *Molecules*, 23(2), 478. <https://doi.org/10.3390/molecules23020478>
- Kumar, H., Kaur, K. and Kaur, R., 2024.** Stress-resilient effect of *Spirulina platensis* on zebrafish chronic unpredictable stress model. *Physiology and Behavior*, 287, 114691. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2024.114691>
- Lawrence, K.P., Long, P.F. and Young, A.R., 2018.** Mycosporine-like amino acids for skin photoprotection. *Current Medicinal Chemistry*, 25(40), 5512-5527. <https://doi.org/10.2174/0929867324666171116112947>
- Llewellyn, C.A. and Airs, R.L., 2010.** Distribution and abundance of MAAs in 33 species of microalgae across 13 classes. *Marine Drugs*, 8: 1273-1291. <https://doi.org/10.3390/md8041273>
- McCluskey, B.M. and Postlethwait, J.H., 2015.** Phylogeny of zebrafish, a “model species,” within *Danio*, a “model genus”. *Molecular Biology and Evolution*, 32(3): 635-652. <https://doi.org/10.1093/molbev/msu323>
- Meşeli, S., Tağtekin, D. and Emekli Alturfan, E., 2025.** Zebrafish, A Model Organism For

- Research in Dentistry. *Selcuk Dental Journal*, 12(1), 144-148. <https://doi.org/10.15311/selcukdentj.1446275>
- Nakamura, H., Kobayashi, J. I. and Hirata, Y., 1981.** Isolation and structure of a 330 nm UV-absorbing substance, asterina-330 from the starfish *Asterina pectinifera*. *Chemistry Letters*, 10(10), 1413-1414. <https://doi.org/10.1246/cl.1981.1413>
- Neale, P.J., Williamson, C.E., Banaszak, A.T., Häder, D.P., Hylander, S., Ossola, R., Rose, K.C., Wangberg, S.A. and Zepp, R., 2023.** The response of aquatic ecosystems to the interactive effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and climate change. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 22(5), 1093-1127. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00370-z>
- Newman, M., Ebrahimie, E. and Lardelli, M., 2014.** Using the zebrafish model for Alzheimer's disease research. *Frontiers in Genetics*, 5:189. <https://doi.org/10.3389/fgene.2014.00189>
- Peng, J., Guo, F., Liu, S., Fang, H., Xu, Z. and Wang, T., 2023.** Recent advances and future prospects of mycosporine-like amino acids. *Molecules*, 28(14), 5588. <https://doi.org/10.3390/molecules28145588>
- Punchakara, A., Prajapat, G., Bairwa, H. K., Jain, S. and Agrawal, A., 2023.** Applications of mycosporine-like amino acids beyond photoprotection. *Applied and Environmental Microbiology*, 89(11), e00740-23. <https://doi.org/10.1128/aem.00740-23>
- Rastogi, R.P., Sonani, R.R. and Madamwar, D., 2023.** Biology, chemistry and applications of mycosporine-like amino acids. *Critical Reviews in Biotechnology*, 43(6):768-790. <https://doi.org/10.1080/07388551.2022.2079204>
- Sara, L., Thanmayee, R., Satyakavya, P.V., Avulapati, T. and Swathi, K., 2022.** Screening of *Spirulina* Components for Anti-Parkinson's and Anti-Alzheimer's Activity by in Silico Methods and Docking Studies. In Worldwide Congress on "Genetics, Geriatrics and Neurodegenerative Diseases Research" (pp. 161-174). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31978-5_13
- Sensui, N. and Hirose, E., 2018.** Cytoplasmic UV-R absorption in an integumentary matrix (Tunic) of photosymbiotic ascidian colonies. *Zoological studies*, 57, e33. <https://doi.org/10.6620/ZS.2018.57-33>
- Siiskonen, H., Smorodchenko, A., Krause, K. and Maurer, M., 2018.** Ultraviolet radiation and skin mast cells: Effects, mechanisms and relevance for skin diseases. *Experimental Dermatology*, 27(1), 3-8. <https://doi.org/10.1111/exd.13402>
- Singh, A., Čížková, M., Bišová, K. and Vitova, M., 2021.** Exploring mycosporine-like amino acids (MAAs) as safe and natural protective agents against UV-induced skin damage. *Antioxidants*, 10(5), 683. <https://doi.org/10.3390/antiox10050683>
- Singh, S.P., Häder, D.P. and Sinha, R.P., 2020.** Mycosporine-like amino acids and photoprotection in cyanobacteria. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 19(6):795-812. <https://doi.org/10.1039/C9PP00493A>
- Singh, V.K., Jha, S., Rana, P., Mishra, S., Kumari, N., Singh, S.C., Anand, S., Upadhye, V. and Sinha, R.P., 2023.** Resilience and mitigation strategies of cyanobacteria under ultraviolet radiation stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(15), 12381. <https://doi.org/10.3390/ijms241512381>

- Sinha, S., Patro, N. and Patro, I.K., 2018.** Maternal protein malnutrition: current and future perspectives of *spirulina* supplementation in neuroprotection. *Frontiers in Neuroscience*, 12:966. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00966>
- Suh, S.S., Hwang, J., Park, M., Seo, H.H., Kim, H.S., Lee, J.H. and Moh, S.H., 2017.** Mycosporine-like amino acids: Potential health and beauty ingredients. *Marine Drugs*, 15(10), 326. DOI: 10.3390/md15100326.
- Tamtaji, O.R., Heidari-soureshjani, R., Asemi, Z. and Kouchaki, E., 2023.** The effects of *spirulina* intake on clinical and metabolic parameters in Alzheimer's disease: A randomized, double-blind, controlled trial. *Phytotherapy Research*, 37(7), 2957-2964. <https://doi.org/10.1002/ptr.xxxxx>
- Tavares, J., Oliveira, A.V., de Souza Nascimento, T., Gomes, J.M.P., Parente, A.C.B., Bezerra, J.R., da Costa, M.D.R., de Aguiar, M.S.S., Sampaio, T.L., Lima, F.A.V. and de Barros Viana, G.S., 2024.** Aqueous extract of *Spirulina* exerts neuroprotection in an experimental model of Alzheimer sporadic disease in mice induced by Streptozotocin. *Metabolic Brain Disease*, 40(1), 26. <https://doi.org/10.1007/s11011-024-xxxxx-x>
- Torres, P., Santos, J. P., Chow, F., Ferreira, M.J.P and dos Santos, D.Y., 2018.** Comparative analysis of in vitro antioxidant capacities of mycosporine-like amino acids (MAAs). *Algal Research*, 34, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.07.007>
- Urrea-Victoria, V., Hernández, A.R., Castellanos, L., Alves, I.A. and Novoa, D.M.A., 2025.** The role of mycosporine-like amino acids in skin care formulations: a patent review (2014–2024). *Photochemical and Photobiological Sciences*, 24(5), 847-861. <https://doi.org/10.1007/s43630-025-00717-8>
- Van Oppen, M.J.H., 2024.** Shining light on the coral photosymbiont family Symbiodiniaceae. *Nature Microbiology*, 9, 1909–1910. <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01745-3>
- Wei, M., He, X., Liu, N. and Deng, H., 2024.** Role of reactive oxygen species in ultraviolet-induced photodamage of the skin. *Cell Division*, 19(1), 1.
- Xia, W., 2010.** Exploring Alzheimer's disease in zebrafish. *Journal of Alzheimer's Disease*, 20(4), 981-990. <https://doi.org/10.3233/JAD-2010-xxxx>
- Yamamoto, R., Toriumi, S., Kawagoe, C., Saburi, W., Kishimura, H. and Kumagai, Y., 2024.** Extraction and antioxidant capacity of mycosporine-like amino acids from red algae in Japan. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 88(7), 830-838. <https://doi.org/10.1093/bbb/zbae053>

Mycosporines and mycosporine-like amino acids (MAAs): Applications, opportunities, and future perspectives in ornamental aquaculture and aquatic animal health

Badali R.^{1*}; Farokhi F.¹; Manaffar R.²; Roshandel R.²

*royabadali79@gmail.com

1-Department of Biology, Faculty of science, Urmia University, Urmia, Iran

2-Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

Abstract

Mycosporines and Mycosporine-Like Amino Acids (MAAs) are a group of naturally occurring secondary metabolites found in cyanobacteria, algae, fungi, and various aquatic organisms. These compounds are well known for their strong ability to absorb ultraviolet radiation (UV-A and UV-B), thereby providing effective photoprotection. Alongside other valuable cyanobacterial bioactive compounds, such as scytonemin and phycobiliproteins, MAAs have attracted considerable scientific interest because of their diverse biological activities. Recent studies have demonstrated that, in addition to their UV-screening function, MAAs possess antioxidant, anti-inflammatory, cytoprotective, and stress-modulating properties. These characteristics have highlighted their potential as novel functional additives in aquaculture. In ornamental aquaculture systems, high stocking densities, transportation, environmental stressors, water quality fluctuations, and disease outbreaks represent major challenges affecting animal health and welfare. Available evidence suggests that MAAs may contribute to improved resilience and physiological performance by reducing oxidative stress, enhancing defense mechanisms, and increasing tolerance to adverse environmental conditions. This review summarizes the chemical structure, biosynthetic pathways, natural sources, extraction methods, and biological properties of MAAs. Furthermore, their potential applications in nutrition, health management, stress mitigation, and the development of innovative products for the ornamental aquaculture industry are discussed. Finally, current challenges, research gaps, and future prospects for the commercialization and application of MAAs in ornamental aquaculture are highlighted.

Keywords: Mycosporine-like amino acids (MAAs), Mycosporines, Ornamental aquaculture, Ornamental fish; Aquatic animal health, Oxidative stress, Cyanobacteria