



University of Tehran

Journal of Fisheries

Home Page: <https://jfisheries.ut.ac.ir>

Online ISSN: 2423-7809

Profiles and variations of mycosporine-like amino acids in phytoplankton communities of Tar Lake

Rezvan Mousavi Nadushan^{1*}  

Corresponding author, Department of marine and fisheries sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, Tehran North Branch, Islamic Azad University Tehran, Iran. Email: r_mousavi.nadushan@iau-tnb.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 11 February 2025
Revised: 01 April 2025
Accepted: 31 May 2025
Published online: 08 July 2025

Keywords:
Ultraviolet radiation,
Mycosporine like amino acids,
sunscreen compounds,
Tar Lake,
Phytoplankton.

ABSTRACT

In mountain lakes during the warm months of the year, phytoplankton communities are exposed to high levels of solar ultraviolet radiation (UVR). These organisms employ various strategies to prevent damage caused by ultraviolet radiation, and one of the strategy is production or accumulation of mycosporine-like amino acids (MAAs). To record this strategy, phytoplankton sampling was conducted monthly during the ice-free period from late April to late September 2021. A 25% aqueous methanol solution (volume/volume) was used as the solvent to extract mycosporine-like amino acids. The analysis of the collected extracts was performed by injecting them into a HPLC device, and the amount of chlorophyll a was measured using ethanol solvent and spectrophotometry. In this study, seven mycosporine-like amino acids were identified in the phytoplankton communities of Tar Lake. Shinorine was dominant in all months, while the concentration of mycosporine-glycine only increased in July, reaching levels equal to that of shinorine. Conversely, in August, Porphyra 334 became dominant alongside shinorine. Throughout the phytoplankton community succession, the dominance of diatoms in spring and green algae during summer was observed. Additionally, the relative abundance of *Dictyosphaerium pulchellum* in the water column during July and August exceeded 85%, indicating that *D. pulchellum* has a high sensitivity to natural ultraviolet radiation and is capable of producing a diverse range of mycosporine-like amino acids. Therefore, the dominance of this phytoplankton in Tar Lake can clearly be attributed to high concentrations and diversity of mycosporine-like amino acids. Furthermore, the monthly patterns of variations in mycosporine-like amino acids during periods of higher radiation and environmental stress align with the idea that these compounds play a significant roles in protecting phytoplankton organisms from damages caused by ultraviolet radiation.

Cite this article: Mousavi Nadushan, R. (2025). Variations of mycosporine-like amino acids in phytoplankton communities of Tar Lake. *Journal of Fisheries*, 78 (2), 107-121. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfisheries.2025.390353.1449>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfisheries.2025.390353.1449>



دانشگاه تهران

مطالعه تغییرات و تنوع آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین در جوامع فیتوپلانکتونی دریاچه تار

رضوان موسوی ندوشن*

نویسنده مسئول، گروه علوم دریایی و شیلاتی، دانشکده علوم و فنون دریایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. ریانامه: r_mousavi.nadushan@iau-tmb.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷

کلیدواژه:

اشعه فرابنفش،
آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین،
ترکیبات ضدآفتاب،
دریاچه تار،
فیتوپلانکتون.

در دریاچه‌های کوهستانی و در ماه‌های گرم سال جوامع فیتوپلانکتونی در معرض سطوح بالایی از تابش‌های ماوراء بنفش خورشیدی (UVR) قرار دارند. این موجودات استراتژی‌های مختلفی برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از تابش ماوراء بنفش دارند و یکی از این استراتژی‌ها تولید و تجمع اسیدهای آمینه شبه مایکوسپورین (MAAs) در پیکره خود است. عملیات نمونه‌برداری فیتوپلانکتون به صورت ماهانه در دوره بدون یخبندان از اردیبهشت تا شهریورماه سال ۱۴۰۰ انجام شد. جهت استخراج آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین، از متانول آبی ۲۵ درصد (حجمی/حجمی)؛ به عنوان حلال استفاده شد. تجزیه و تحلیل عصاره‌های جمع‌آوری شده با تزریق آنها به دستگاه HPLC انجام شد، و میزان کلروفیل *a* با استفاده از حلال اتانول و روش اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری گردید. در این تحقیق در جوامع فیتوپلانکتونی دریاچه کوهستانی تار هفت آمینواسید شبه مایکوسپورین شناسایی شد. شینورین در تمام ماه‌ها غالب بود، درحالی‌که غلظت مایکوسپورین-گلايسین تنها در تیرماه ماه افزایش و به سطح مساوی با شینورین رسید. بالعکس، در ماه مرداد پورفیرا ۳۳۴ همراه با شینورین افزایش یافت. طی مطالعه توالی جوامع فیتوپلانکتونی، غالبیت دیاتومه‌ها در فصل بهار و جلبک‌های سبز در طول تابستان مشاهده شد. همچنین فراوانی نسبی *Dictyosphaerium pulchellum* در ستون آب و در ماه‌های تیر و مرداد به بیش از ۸۵ درصد رسید و مشخص گردید که *D. pulchellum* به تابش‌های طبیعی پرتوهای فرابنفش حساسیت بالایی دارد و قادر است طیف متنوعی از آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین را تولید نماید. بنابراین برتری این فیتوپلانکتون در دریاچه تار می‌تواند به وضوح به دارا بودن غلظت‌های بالا و تنوع آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین مربوط باشد. علاوه بر این، الگوهای ماهانه تغییرات در آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین در زمان‌های افزایش تابش و استرس‌های محیطی با این ایده سازگار است که این ترکیبات نقش مهمی در حفاظت از موجودات فیتوپلانکتونی در برابر آسیب‌های ناشی از پرتوهای فرابنفش ایفا می‌کنند.

استناد: موسوی ندوشن؛ رضوان (۱۴۰۴). بررسی تغییرات آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین در جوامع فیتوپلانکتونی دریاچه تار در فصل گرم سال. نشریه شیلات، مجله منابع طبیعی ایران، ۷۸ (۲)، ۱۰۷-۱۲۱. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfisheries.2025.390353.1449>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfisheries.2025.390353.1449>



۱. مقدمه

پرتوهای فرابنفش (UVR) که به سطح زمین می‌رسند (۴۰۰-۲۸۰ نانومتر) به عنوان عوامل محیطی شناخته می‌شوند که در فتوسنتز و جذب مواد مغذی اختلال ایجاد می‌کنند (Geraldes *et al.*, 2021; Raj *et al.*, 2021; Peng *et al.*, 2023). این پرتوها علاوه بر اختلال در سنتز پروتئین و فعالیت برخی آنزیم‌ها، با آسیب و یا تخریب DNA سلول‌های فیتوپلانکتونی باعث کاهش تولیدات اولیه در اکوسیستم‌های آبی می‌گردند (Sen and Mallick 2021; Kim *et al.*, 2022). در عین حال، فیتوپلانکتون‌ها چندین استراتژی برای مقابله با پرتوهای فرابنفش توسعه داده‌اند. به علاوه، شدت آسیب ناشی از پرتوهای فرابنفش بر اساس گونه‌های فیتوپلانکتون متفاوت است، زیرا ارگانسیم‌ها و گونه‌های مختلف، مکانیسم‌های فتوحفاظتی متفاوتی را به کار می‌گیرند (Ficek and Woźniak 2013; Ha *et al.*, 2015).

برخی از موجودات زنده، از جمله فیتوپلانکتون‌ها، ترکیبات ضدآفتاب و کاروتنوئیدها را تولید می‌کنند تا از اجزای سلولی حساس خود در برابر پرتوهای فرابنفش محافظت نمایند. این ترکیبات به‌بقای آنها در محیط‌های مملو از پرتوهای فرابنفش از جمله، اکوسیستم‌های آبی شفاف کمک می‌کنند (Nandagopal *et al.*, 2021; Boucar *et al.*, 2021). از مهمترین ترکیبات محافظت‌کننده و یا ضدآفتاب می‌توان به آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین (MAAs) اشاره نمود که به واسطه خواص و قابلیت جذب پرتوهای فرابنفش (طول موج ۳۶۲-۳۱۰ نانومتر) شناخته شده‌اند و توسط تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان اولیه دریایی و آب شیرین یا بیوسنتز می‌شوند و یا انباشته می‌گردند (Vega *et al.*, 2023; Görünmek, 2024). آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین مولکول‌هایی کوچک (<۴۰۰ Da)، محلول در آب و از گروه آمینوسیکلوهاگزون با جانشین‌های آمینویی الکلی، یا حلقه‌های آمینوسیکلوهاگزین هستند که اشعه ماوراء بنفش را جذب می‌کنند (La Barre, 2014).

پرتوهای فرابنفش به عنوان عاملی مؤثر بر فیتوپلانکتون و حتی جوامع بنتیک شناخته شده است. چندین گزارش در مورد اثرات پرتوهای فرابنفش بر موجودات زنده در دریاچه‌های آلپ و استراتژی‌ها محافظتی آنها موجود است. اغلب گزارش‌ها نشان می‌دهند که حساسیت در برابر تابش پرتوهای فرابنفش بسته به گونه و ساختار جامعه متفاوت است. با این حال، در دریاچه‌های واقع در عرض‌های جغرافیایی بالا (که به راحتی تحت تأثیر فرآیند اسیدی شدن، گرم شدن اقلیمی و جهانی قرار می‌گیرند)، اثرات پرتوهای فرابنفش نیز می‌تواند به طور قابل توجه و به شدت تحت تأثیر تغییرات محیطی قرار گیرد. برای مناطق معتدله کره زمین نیز همچنان اثرات مخرب پرتوهای فرابنفش بر موجودات آبی وجود دارد.

آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین (MAAs) ترکیباتی هستند که به طور گسترده در موجودات فیتوپلانکتونی و زئوپلانکتونی دریاچه‌های کوهستانی وجود دارند و قادر به جذب UV هستند. مطالعات تا هشت نوع مختلف MAAs را در این ارگانسیم‌ها شناسایی کرده است که شینورین (shinorine) در میان آنها غالب است (Laurion *et al.*, 2002; Tartarotti *et al.*, 2006). غلظت MAAs معمولاً با افزایش عمق در ستون آب کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده نقش محافظتی نوری آنهاست. بالاترین غلظت‌ها معمولاً در دریاچه‌های شفاف و کم عمق یافت می‌شود و با ارتفاع افزایش می‌یابد (Korbee *et al.*, 2012; Sonntag *et al.*, 2017). محتوای آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین با سطوح بالاتر در تابستان نسبت به دوره‌های یخبندان نوسانات فصلی را نشان می‌دهد. در زئوپلانکتون‌ها، بالاترین میزان آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین در تخم‌ها و مراحل اولیه زندگی ساخته می‌شود تا حفاظت نوری برای زاده‌ها فراهم شود. در حالی که قرار گرفتن در معرض پرتوهای فرابنفش بر سنتز آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین تأثیر می‌گذارد، عوامل دیگری مانند دمای آب نیز نقش مهمی در تنظیم تولید آنها ایفا می‌کنند (Franklin *et al.*, 2002; Carreto *et al.*, 2011).

آب‌های عرض‌های جغرافیایی و ارتفاعات بالا معمولاً غلظت‌های پایینی از مواد آلی محلول و معلق دارند و در نتیجه تابش‌های فرابنفش تا اعماق ستون آب نفوذ می‌کنند. در سال‌های اخیر، نرخ کاهش لایه آزون و تشدید نفوذ اشعه فرابنفش بین ۲۰ تا ۹۰ درصد در مناطق مختلف سطح کره زمین گزارش شده است (Taalas *et al.*, 2000). تابش اشعه فرابنفش در ارتفاعات از نظر زیست‌محیطی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا موجودات زنده به شدت‌های بالای تابش اشعه فرابنفش ناشی از تخریب آزون سازگار نشده‌اند (Korbee *et al.*, 2012; Punchakara *et al.*, 2023). علاوه بر این، دماهای سرد ممکن است فرآیندهای آنزیمی مربوط به ترمیم آسیب‌های ناشی از اشعه فرابنفش از جمله مهار تخریب پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و سایر بیومولکول‌ها را کاهش دهند.

و یا متوقف سازند و بدین ترتیب اثرات مخرب ناشی از قرار گرفتن در معرض تابش اشعه فرابنفش را تشدید نمایند. از آنجا که تاکنون روی ساختارشناسی جمعیت فیتوپلانکتون‌های دریاچه کوهستانی تار هیچ گونه مطالعه‌ای صورت نگرفته است، این تحقیق با هدف شناسایی و مطالعه تأثیر ساختار و توالی جوامع فیتوپلانکتونی بر تنوع و میزان آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین (MAAs) اجرا گردید. طی این تحقیق، فیتوپلانکتون‌های جمع‌آوری شده از سطح آب دریاچه شناسایی شدند و سپس تغییرات در ترکیب کیفی و کمی آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین در آنها مورد بررسی قرار گرفت.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. دریاچه تار

دریاچه تار در موقعیت جغرافیایی $35^{\circ}43'44''$ درجه شمالی و $52^{\circ}13'40''$ شرقی و در استان تهران قرار دارد. دریاچه زمین‌ساختی تار در ۳۰ کیلومتری شرق شهرستان دماوند، از جمله دریاچه‌های آب شیرین کوهستانی است. سرشاخه آب‌هایی که به این دریاچه می‌ریزد، چشمه‌ساران کوه‌های قره‌داغ، سیاه‌چال و شاه‌نشین در شمال و آبراهه‌های فصلی از جنوب است که قسمتی از آب آنها وارد دریاچه می‌شود و قسمتی دیگر، آب رودهای تار و هویر را تأمین می‌کند.

موقعیت جغرافیایی منطقه‌ای که دریاچه تار در آن واقع است به گونه‌ای است که گرداگرد آن را کوه‌هایی در بر گرفته است که از سطح دریاچه بین ۵۰ تا ۵۰۰ متر ارتفاع دارند. وجود این ارتفاعات در کنار یکدیگر بدون آنکه دره‌ای آن را شکافته باشد موجب پیدایش گودالی شده است که دریاچه تار در آن تشکیل شده است. دریاچه تار در جهت شمال غرب به جنوب شرق امتداد یافته و طول آن حدود ۲۵۰ متر و عرض آن حدود ۱۵۰ متر می‌باشد. آب دریاچه بسیار سرد می‌باشد و البته به دلیل شیرین بودن سنگینی آن احساس می‌شود. این دریاچه در مدخل کوه و در ارتفاع ۳۲۳۰ متری قرار دارد و سطح آب آن در فصل‌های گوناگون سال متغیر است.

دریاچه تار یکی از دریاچه‌های کوهستانی آب شیرین و الیگوتروف ایران است، که تاکنون در زمینه ساختارشناسی جمعیت فیتوپلانکتونی در آن هیچ مطالعه‌ای صورت نگرفته است. بنابراین در این تحقیق نمونه‌برداری طی ۵ ماه (اردیبهشت تا شهریور ۱۴۰۰) در ۳ ایستگاه صورت گرفت. سه ایستگاه نمونه‌برداری به دلیل کشیدگی طولی دریاچه در دو سر و مرکز دریاچه مشخص شدند (شکل ۱) و نمونه‌برداری با استفاده از قایق بادی انجام پذیرفت.



شکل ۱- نقشه و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در دریاچه تار

برای کاهش خطای نمونه‌برداری، نمونه‌ها در سه تکرار برداشت شدند. به دلیل سختی مسیر دسترسی به دریاچه در فصول سرد و همچنین انجماد سطح آب دریاچه در فصل زمستان، عملیات نمونه‌برداری فیتوپلانکتون‌ها به صورت ماهانه در دوره بدون یخ از فروردین تا شهریورماه سال ۱۴۰۰ انجام گرفت. در هر نمونه‌برداری شاخص‌های فیزیکی آب شامل دما و اکسیژن محلول توسط دستگاه پرتابل (WTW InoLab Multi 720 field probe) و در محل مورد سنجش قرار گرفتند. نمونه‌های آب در هر عملیات نمونه‌برداری از قایق، از عمق ۱۰ متری تا سطح توسط تور پلانکتون Hydrobios مجهز به جریان‌سنج عددی با قطر ۲۰ سانتی‌متر با قطر چشمه ۲۵ میکرون فیلتر و نمونه‌های جمع‌آوری شده (حاصل از فیلتراسیون ۵۰۰ لیتر) در یک لیتر آب شناور و جهت حذف زئوپلانکتون‌ها مجدداً از تور دیگری با قطر منافذ ۱۰۰ میکرون عبور داده شدند (هرچند که تعدادی ناپلیوس کوچک و روتیفر ممکن است همراه فیتوپلانکتون‌ها از تور عبور نمایند). سپس نمونه‌های آب حاصل از فیلتراسیون ثانویه در بطری‌های یک لیتری جمع‌آوری و در شرایط تاریکی و در کنار یخ به آزمایشگاه انتقال داده شدند. در آزمایشگاه نمونه‌های آب توسط فیلترهای واتمن (GF/F) با قطر منافذ ۰/۴۵ میکرون فیلتر شدند. تمام فیلترهای حاوی نمونه‌های فیتوپلانکتونی بلافاصله در دمای منفی ۸۰ درجه سانتی‌گراد تا زمان استخراج منجمد و ذخیره شدند. برای سنجش کلروفیل *a*، یک لیتر از آب هر نمونه‌برداری به وسیله کاغذ صافی واتمن ۰/۴۵ میکرون با کمک پمپ خلأ صاف گردیدند و نمونه‌های فیلتر شده توسط الکل استخراج و جذب آنها در طول موج‌های ۶۳۰، ۶۴۷ و ۶۶۶ نانومتر قرائت گردید. در نهایت غلظت کلروفیل *a* براساس فرمول زیر محاسبه گردید (Ghiyas Abadi et al., 2014).

$$\text{Chl } a = 11.58 \text{ A666} - 1.54 \text{ A647} - 0.08 \text{ A630}$$

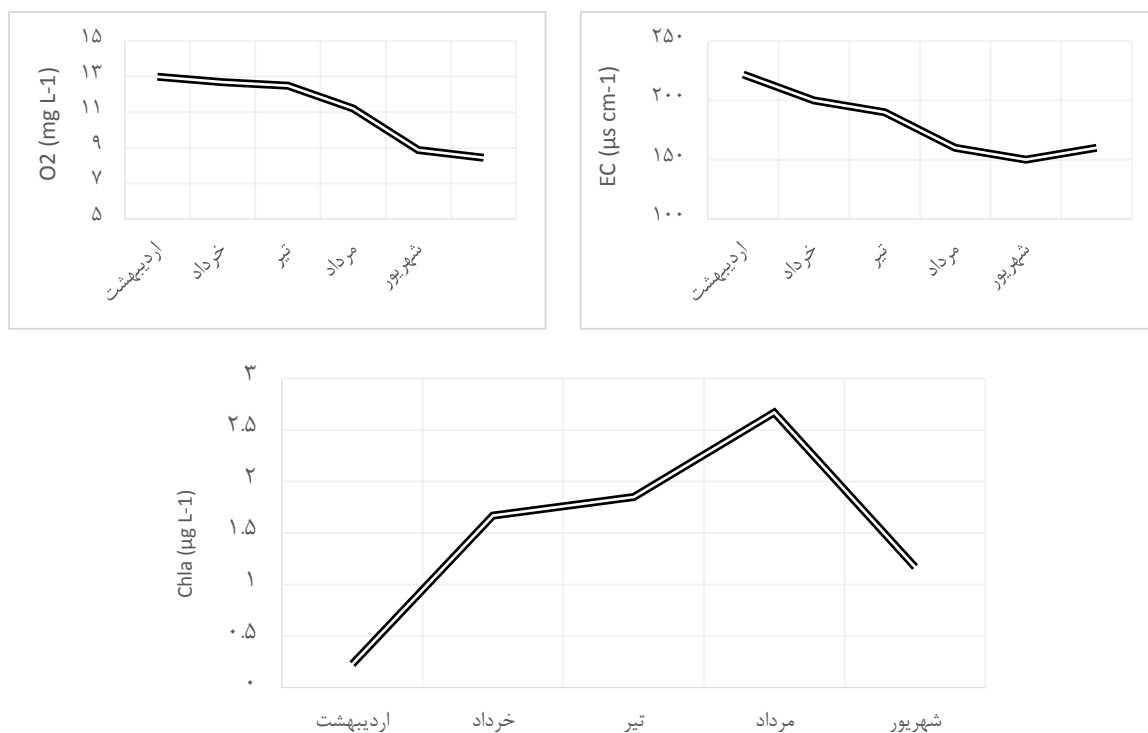
۲-۲. استخراج، تجزیه و تحلیل کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا

به‌طور خلاصه، نمونه‌ها در متانول آبی ۲۵ درصد (حجمی/حجمی)؛ در دمای محیط به مدت ۲ ساعت استخراج شدند. نمونه‌ها در زمان استخراج به مدت ۱ دقیقه به صورت مداوم در ۴۰ وات سونیکیت شدند. عصاره‌های جمع‌آوری شده با استفاده از فیلترهای GF/F صاف و تغلیظ شدند. تجزیه و تحلیل عصاره‌های جمع‌آوری شده با تزریق آنها به یک ستون 5- μm (250 $\times$ 4.6 mm, Beckman, USA) C18 در یک دستگاه HPLC (Knauer Co., Berlin, Germany) انجام شد. جداسازی MAA با استفاده از فازهای متحرک A و B به ترتیب ۰/۲ درصد اسید فرمیک در آب و ۰/۲ درصد اسید فرمیک در استونیتریل ACN انجام شد. برنامه جریان در ستون براساس یک شیب ۱۰۰ درصد فاز متحرک A از صفر تا ۷ دقیقه، ۳۰ درصد فاز متحرک A و ۷۰ درصد فاز متحرک B از ۷ تا ۱۵ دقیقه و ۲۰ درصد B + ۸۰ درصد A، از ۱۵ تا ۲۰ دقیقه، با نرخ جریان ۱ میلی‌لیتر در دقیقه و دمای ستون در ۳۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. پیک‌ها در ۳۱۰، ۳۲۰ و ۳۴۰ نانومتر اسکن و ثبت گردیدند (Tartarotti and Sommaruga, 2006; Roohi-Shalmaee et al., 2020).

به منظور تثبیت نمونه‌های فیتوپلانکتونی جمع‌آوری شده برای شناسایی از فرمالین ۲ درصد استفاده شد. شناسایی نمونه‌های برداشت شده توسط میکروسکوپ نوری و کلیدهای شناسایی (Bellinger 1992; Ghiyas Abadi et al., 2014; Wear et al., 2015; Hasani et al., 2025) انجام شد و جهت بررسی کمی و شمارش از لام سدویک-رفتر استفاده شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel و جهت اجرای آزمون‌های آماری، از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ استفاده شد. داده‌ها به صورت میانگین ± 1 انحراف معیار گزارش شدند. سطح معنی‌داری ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. و در نهایت آزمون تجزیه واریانس یک طرفه ANOVA و آزمون تعقیبی توکی جهت تعیین معنی‌داری و سطح معنی‌داری داده‌ها به کار گرفته شدند.

۳. یافته‌های پژوهش

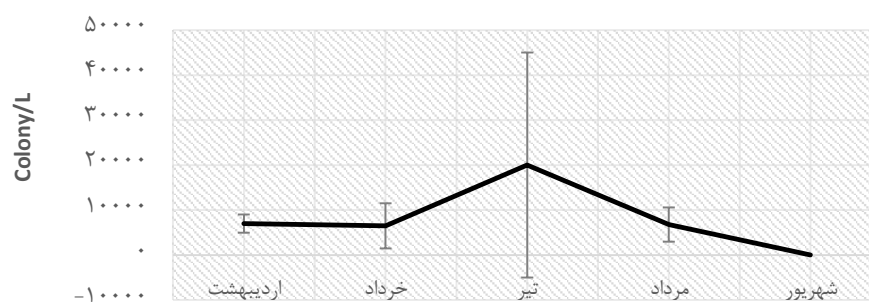
در دریاچه تار و طی ماه‌های مورد مطالعه، مقادیر اکسیژن محلول (DO) بالا بود و در ماه فروردین به حداکثر ۱۳ میلی‌گرم در لیتر رسید. مقادیر pH در طول دوره بررسی بین ۷/۲۳ تا ۸/۳ متغیر بود که نشان می‌دهد مقادیر قلیایی و دامنه کم تغییرات تحت تأثیر ذوب برف و زمین‌شناسی محیط اطراف قرار دارد، و از فعالیت‌های زیستی تأثیر نمی‌پذیرد. همچنین در فصل تابستان، دریاچه تار دمای بالاتر و مقادیر اکسیژن محلول و pH کمتری را نشان داد، این در حالی است که مقادیر و الگوی فصلی متغیرهای مذکور در محدوده دامنه تغییرات کیفی آب در دریاچه‌های الیگوتروف قرار دارد (شکل ۲).



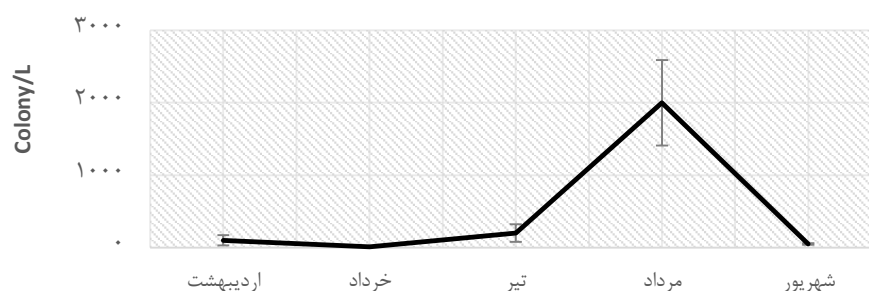
شکل ۲- نوسانات میانگین دما، اکسیژن محلول و کلروفیل *a* در ماه‌های مورد مطالعه

در دریاچه تار، جلبک‌های سبز بیشترین میانگین فراوانی (5210.7 ± 410.74) و تنوع گونه‌ای (۱۰ گونه) را به‌خود اختصاص دادند و گونه *Dictyosphaerium pulchellum* در ماه تیر گونه غالب بود و فراوانی آن به 24363 ± 28592 عدد در لیتر رسید (شکل ۳).

Dictyosphaerium pulchellum

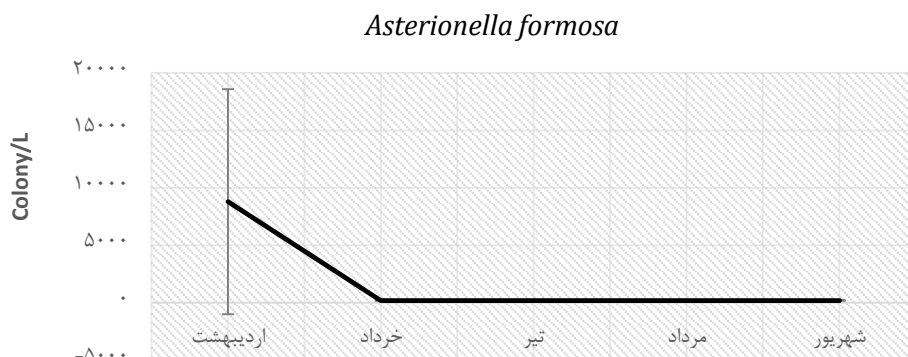


Gonium pectoral



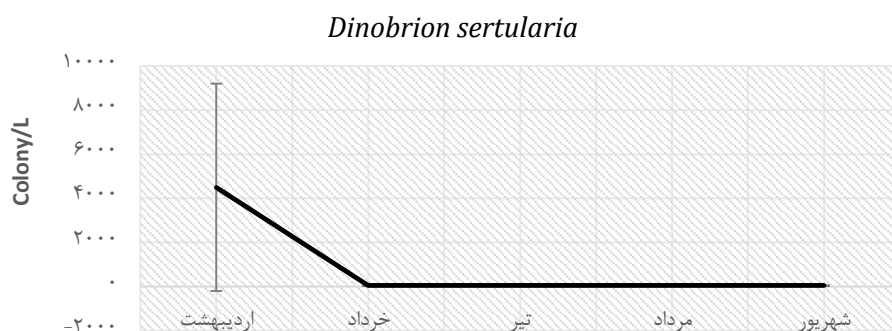
شکل ۳- تغییرات فراوانی گونه‌های غالب *Dictyosphaerium pulchellum* و *Gonium pectoral* در ماه‌های گرم سال در دریاچه تار

دیاتومه‌ها و گونه غالب آن *Asterionella formosa* در ماه اردیبهشت حداکثر فراوانی را نشان دادند ($10046/80 \pm 8065/33$) و (10025 ± 8005) و از ماه خرداد سایر گروه‌های فیتوپلانکتونی در جمعیت جایگزین شدند (شکل ۴).



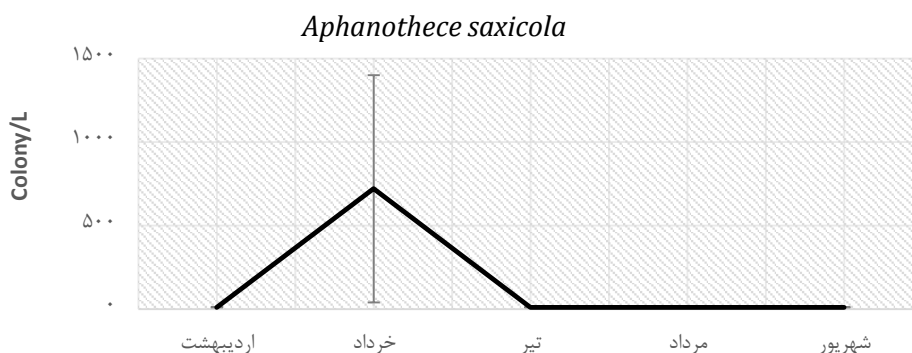
شکل ۴- تغییرات فراوانی دیاتومه غالب *Asterionella formosa* در ماه‌های گرم سال در دریاچه تار

Chrysophyta گروه فیتوپلانکتونی دیگری بودند که در اردیبهشت غالبیت موقت نشان دادند و حداکثر فراوانی گونه غالب آن، *Dinobryon sertularia*، به 4538 ± 3866 عدد در لیتر رسید (شکل ۵).



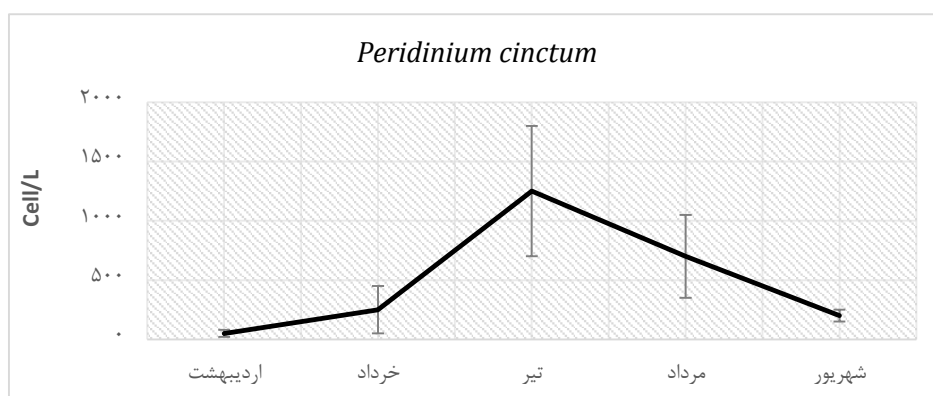
شکل ۵- تغییرات فراوانی گونه غالب *Dinobryon sertularia* از Chrysophyta در ماه‌های گرم سال در دریاچه تار

در ماه خرداد جلبک‌های سبزآبی گروه غالب بودند که فراوانی آنها ناچیز و حضور آنها موقت بود. در این ماه فراوانی گونه غالب *Aphanothece saxicola* به 577 ± 521 رسید (شکل ۶).



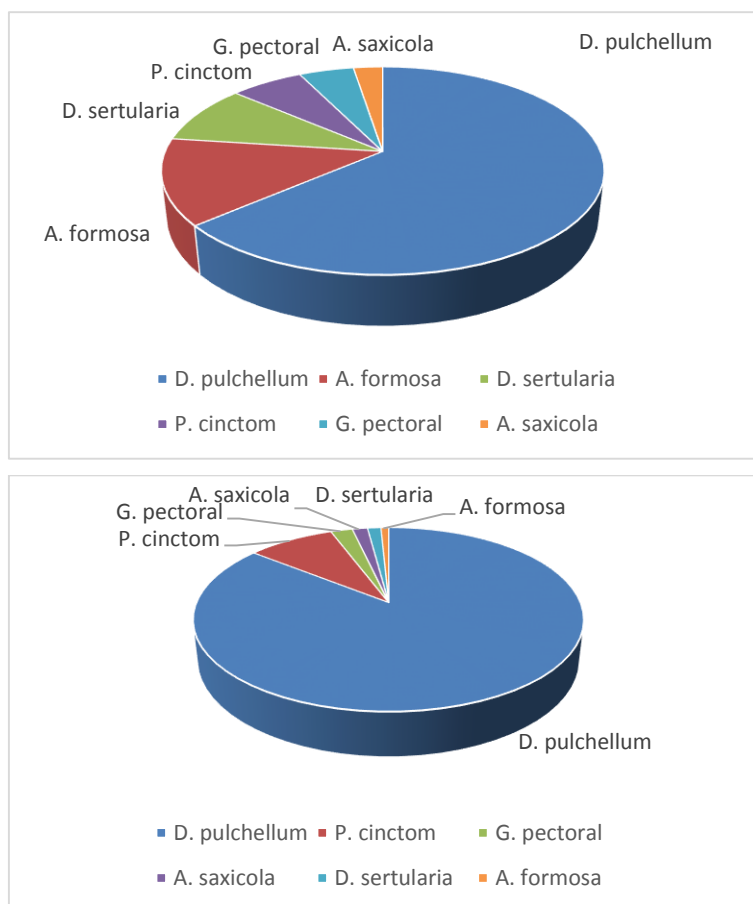
شکل ۶- تغییرات فراوانی جلبک سبزآبی غالب *Aphanothece saxicola* در ماه‌های گرم سال در دریاچه تار

در تیرماه دینوفلاژله‌ها هرچند با فراوانی محدود جمعیت غالب را داشتند و حداکثر فراوانی گونه غالب *Peridinium cinctum* به 1146 ± 649 رسید (شکل ۷).



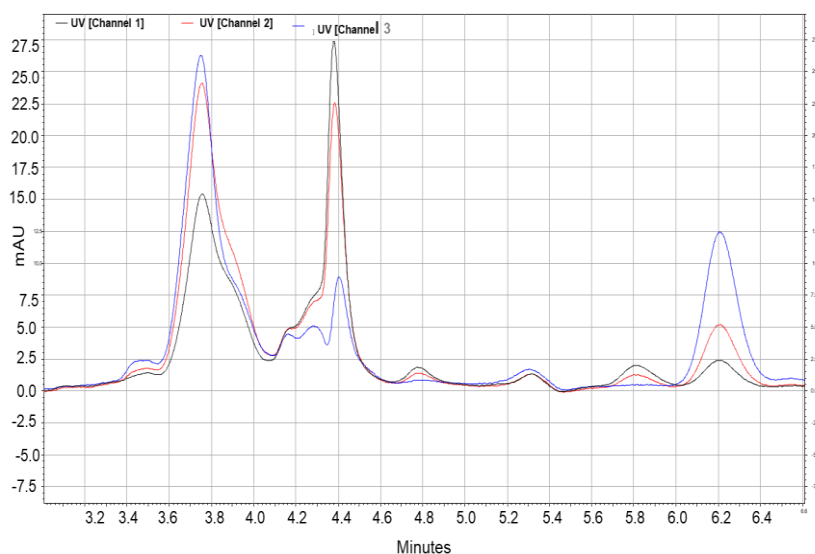
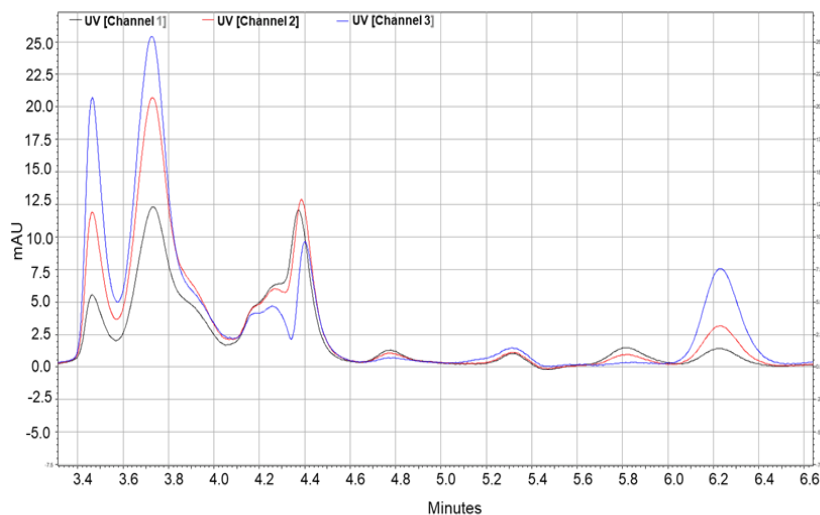
شکل ۷- تغییرات فراوانی دینوفلاژله غالب *Peridinium cinctum* در ماه‌های گرم سال در دریاچه تار

همان‌طور که اشاره شد، *Dictyosphaerium pulchellum* به‌عنوان گونه غالب در دریاچه تار شناسایی گردید و ۶۳ درصد از فراوانی کل جمعیت و ۸۵ درصد از جمعیت ماه مرداد را به‌خود اختصاص داد (شکل ۷). پس از آن *Asterionella formosa* دومین گونه غالب در کل جمعیت بود که ۱۳ درصد از فراوانی را در جمعیت به‌خود اختصاص داد اما در ماه مرداد دومین گونه غالب *Peridinium cinctum* بود و ۸/۸ درصد از فراوانی جمعیت را به‌خود اختصاص داد (شکل ۸).



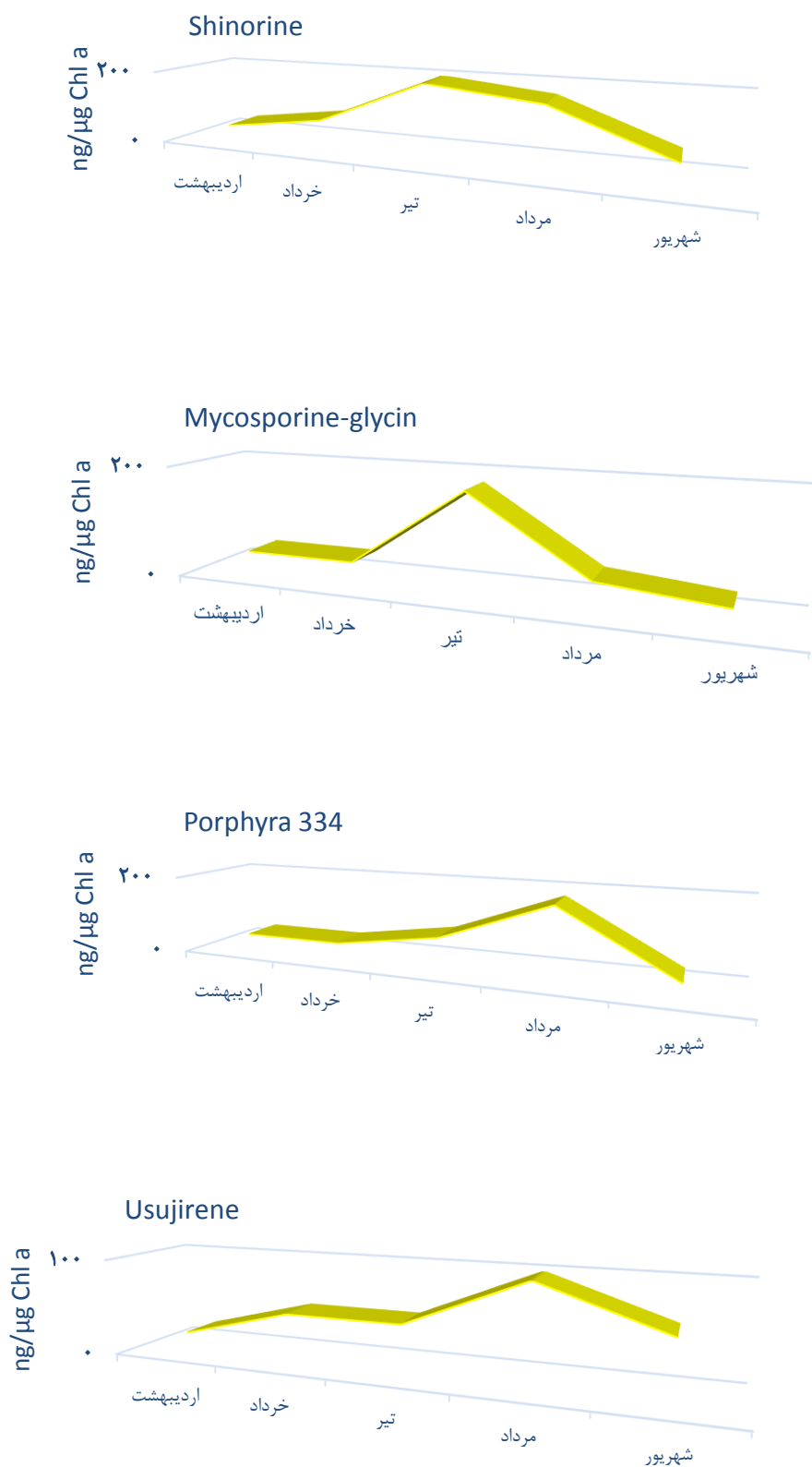
شکل ۸- درصد فراوانی گونه‌های غالب فیتوپلانکتونی در کل دوره و در تیر ماه در دریاچه تار

هفت نوع مختلف MAA در فیتوپلانکتون‌های مورد مطالعه شناسایی شد: مایکوسپورین-گلیسین (mycosporine-glycine)، شینورین (shinorine)، پورفیرا-۳۳۴ (porphyra-334)، پالیتین (palythine)، آسترینا (asterina)، پالیتینول (palythanol)، یوسوجیرن (usujiorene) (شکل ۹).

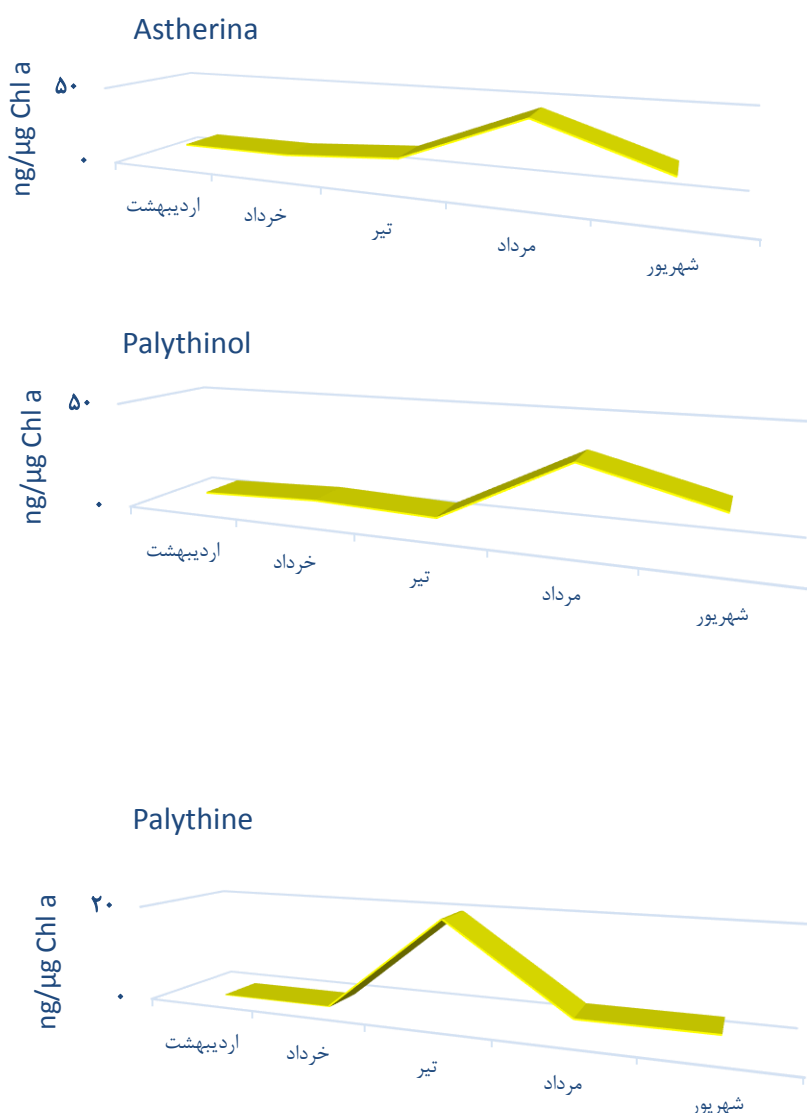


شکل ۹- کروماتوگرام HPLC پروفایل آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین در نمونه‌های تیر و مرداد که در طول موج‌های ۳۱۰ (Channel 1)، ۳۲۰ (Channel 2) و ۳۳۴ (Channel 3) نانومتر پایش شده‌اند. پیک‌های شناسایی شده به ترتیب از چپ به راست مربوط به آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین: مایکوسپورین-گلیسین، شینورین، پورفیرا-۳۳۴، پالیتین، آسترینا، پالیتینول و یوسوجیرن می‌باشند.

مایکوسپورین-گلیسین، شینورین، پورفیرا-۳۳۴ و یوسوجیرن در تمام نمونه‌ها در طول دوره مطالعه حضور داشتند، در حالی که میزان سایر ترکیب‌ها کمتر بود. حداکثر میزان مایکوسپورین-گلیسین، شینورین، پورفیرا-۳۳۴ و پالیتین در ماه تیر و حداکثر غلظت آسترینا، پالیتینول (palythanol)، یوسوجیرن (usujiorene) در مرداد ماه مشخص گردید (شکل ۱۰).



شکل ۱۰ - تغییرات غلظت آمینواسیدهای شبیه مایکوسپورین در ماه‌های گرم سال:
(a) میکوسپورین-گلیسین، (b) شینورین، (c) پورفیرا-۳۳۴، (d) یوسوجیرن، (e) آسترینا، (f) پالیتینول و (g) پالیتین.



ادامه شکل ۱۰- (e) آسترینا، (f) پالیتینول و (g) پالیتین.

۴. بحث و نتیجه گیری نهایی

آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین به طور گسترده‌ای در میان گروه‌های فیتوپلانکتونی اکوسیستم‌های آب شیرین توزیع شده‌اند و دامنه وسیعی از نظر موقعیت جغرافیایی و همچنین ویژگی‌های نوری و شیمیایی آب را پوشش می‌دهند. این ترکیبات در تمام فیتوپلانکتون‌های دریایی و آب شیرین مورد بررسی تاکنون، وجود دارند (de Oliveira et al., 2021; Weiss et al., 2022; Görünmek et al. 2024). در این تحقیق تقریباً اغلب انواع ترکیبات آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین ردیابی شده در گونه‌های مختلف فیتوپلانکتونی آب شیرین شناسایی شده‌اند، اما در مطالعات مختلف تعداد آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین موجود و غالبیت آنها به شدت متفاوت است. تمام جوامع و گونه‌های فیتوپلانکتونی بررسی شده حداقل سه ترکیب (Ha et al., 2015) و یا چهار ترکیب (Kim et al., 2024) و گونه‌های مختلف ممکن است چند نوع دیگر و یا حتی انواعی از آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین ناشناخته داشته باشند. حداکثر تعداد آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین در فیتوپلانکتون‌های آب شیرین به ۹ می‌رسد (Tartarotti et al., 2006)، که نزدیک به حداکثر تعداد ۱۰ عدد گزارش شده در مرجان *Stylophora pistillata* و بیشتر از ۴ آمینواسید شبه مایکوسپورین شناسایی شده برای یک ترانسکت دریایی در دریای جنوب واقع در چندین دماغه از غرب نیوزیلند تا شبه جزایر قطب

جنوب است (Weiss et al., 2022). مزیت داشتن چندین MAA با حداکثر جذب متفاوت ممکن است در یک سیستم فیلتر نوری مؤثرتر نهفته باشد. جالب است که کوبه‌پودهای آب شیرین نیز که در دریاچه‌های بسیار شفاف و در معرض UV زندگی می‌کنند، ۹ نوع متفاوت از ضدآفتاب‌ها را دارند و دامنه کامل جذب آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین آنها از ۳۱۰ تا ۳۶۰ نانومتر را پوشش می‌دهد، در حالی که کوبه‌پودهای *Parabroteas sarsi* و *Boeckella meteoris* که در اعماق سیستم‌های آبی با تضعیف و مهار پرتوهای فرابنفش توسط ذرات محلول و معلق زندگی می‌کنند، تنها چهار ترکیب متمایز آمینواسید شبه مایکوسپورین دارند. در واقع، تعداد آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین موجود در گونه‌ها و جمعیت‌های مختلف کوبه‌پودهای آب شیرین با شفافیت دریاچه ارتباط مستقیم دارد (Tartarotti et al., 2006).

در بازه زمانی مورد مطالعه، تغییرات غلظت‌های پالیتین (palythine)، آسترینا (asterina)، پالیتینول (palythanol) افزایش اندکی را در دامنه صفر تا ۵۰ نانوگرم در ماه‌های تیر و مرداد با حداکثر تابش خورشید و حداکثر میزان کلروفیل *a* نشان دادند، در حالی که غلظت‌های مایکوسپورین-گلیسین، شینورین، پورفیرا-۳۳۴ و یوسوجیرن (usujiorene) در همین ماه‌ها (تیر و مرداد با تابش‌های شدید و حداکثر غلظت کلروفیل *a*) افزایش چشمگیری تا حد ۲۰۰-۱۰۰ نانوگرم را نشان دادند (شکل ۹). اگرچه تمامی ۶ ترکیب جذب‌کننده پرتوهای ماوراء بنفش در ۵ ماه مورد مطالعه در دریاچه تار شناسایی شدند، اما ترکیبات غالب در همه ماه‌ها و به‌ویژه در ماه‌های گرم به‌ترتیب شینورین و سپس مایکوسپورین-گلاسیسین بودند. یافته‌های مشابه در میان چندین گونه فیتوپلانکتونی دریایی به‌دست آمد که توسط Whitehead (۲۰۰۱) بررسی شده بود و ترکیبات غالب پالیتین و پس از آن شینورین بودند. این پروفایل تا حدودی مشابه با نتایج مربوط به توزیع آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین در گونه‌های فیتوپلانکتونی دریاچه‌های آلپ و پیرنه است که توسط Laurion (۲۰۰۲) بررسی شد که در آنجا ترکیبات غالب به‌ترتیب شینورین و پالیتین بودند. هرچند که، اطلاعات در زمینه تغییرات زمانی غلظت‌های آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین برای فیتوپلانکتون‌های آب شیرین محدود است، تحقیقات Laurion و همکاران (۲۰۰۲) نیز به محتوای بالاتر آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین در مجموعه‌های فیتوپلانکتون طبیعی از دریاچه‌های کوهستانی در اواسط تابستان (June) در مقایسه با پاییز (October) در ۲۶ دریاچه واقع در کوه‌های آلپ و پیرنه اشاره کردند. در تحقیق Laurion (۲۰۰۲) در مجموع ۲۶ دریاچه ۷ آمینواسید شبه مایکوسپورین شامل *palythene*, *asterina*, *porphyra-334*, *shinorine* و *palythine* شناسایی شدند. بالاترین حضور و بالاترین غلظت‌های آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین در دریاچه‌های مذکور، شینورین و پالیتین بودند. مایکوسپورین-گلیسین، پورفیرا-۳۳۴، آسترینا، پالیتین و یوسوجیرن (*usujiorene*)، از غلظت‌های بسیار اندک ولی قابل ردیابی تا حداکثر ۴۷ درصد از کل آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین شناسایی شده در دریاچه‌های آلپ و پیرنه را شامل شدند. به‌عنوان مثال، در دریاچه شفاف Gossenköllesee، شینورین فراوان‌ترین آمینواسید شبه مایکوسپورین بود (میانگین غلظت آن در کل ستون آب به ۸۲ درصد رسید)، و پس از آن آسترینا (۱۴ درصد) و پالیتین (۵ درصد) را به‌خود اختصاص دادند. دریاچه Lichtsee در ماه ژوئیه، دریاچه Obersee در ماه اکتبر و دریاچه Piburgersee در ماه ژوئیه بالاترین تنوع آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین و بالاترین تنوع فیتوپلانکتونی را در آب‌های سطحی خود در برداشتند. فیتوپلانکتون چندین دریاچه از جمله Drachensee تنوع پایینی از آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین را نشان دادند، به‌طوری که بیش از ۹۳ درصد از کل آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین شناسایی شده، از شینورین تشکیل شده بود. میزان پورفیرا همیشه و در همه دریاچه‌های آلپی پایین بود. از سوی دیگر، دریاچه Lichtsee به‌ویژه غلظت‌های بالایی از مایکوسپورین-گلاسیسین و پالیتین (به‌ترتیب ۳۴ و ۱۴ درصد، در ماه اکتبر) داشت، و این در حالی است که دو آمینواسید شبه مایکوسپورین مذکور معمولاً در نسبت‌های کمتری (به‌طور میانگین ۵ و ۲ درصد، به‌ترتیب) در سایر دریاچه‌های آلپی، یافت می‌شدند.

طی تحقیق حاضر در دریاچه تار، بالاترین تنوع و غلظت ترکیبات آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین در ماه مرداد به ثبت رسید. و این درحالی است که تنوع بالایی از ترکیبات آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین و بالاترین غلظت در دریاچه Mittlere Plenderlesee در ماه July (۱۰ تیر الی ۲۰ مرداد) مشاهده شد. این دریاچه، که در ارتفاع ۲۳۱۷ متری از سطح دریا قرار دارد، یکی از دریاچه‌های با تابش بالای پرتو فرابنفش و دارای یک جامعه فیتوپلانکتونی متمایز، با غالبیت جلبک‌های *Chrysophytes* (*Ochromonas*)، دینوفلاژله‌های درشت (*Gymnodinium* sp. و *Peridinium* sp.) و سایر دینوفلاژله‌های کوچک بود و میانگین کلروفیل *a* در آن

به ۲/۴ میکروگرم در لیتر رسید (Laurion et al., 2002). این دریاچه همچنین مشابه با دریاچه تار غلظت نسبتاً بالایی از مایکوسپورین-گلیسین را نشان داد و این در حالی است که در میان انواع آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین، برای مایکوسپورین-گلیسین عملکرد آنتی اکسیدانی بسیار بالا به اثبات رسیده است (Shick and Dunlap, 2002; Singh et al., 2022). دریاچه Estany Redo همچنین یکی از شفاف‌ترین دریاچه‌های نمونه‌برداری شده آلفی، اما به مراتب عمیق‌تر از Mittlere Plenderlee (عمق حداکثر ۷۳ متر) است. این دو دریاچه آلفی نیز تنوع بالایی از آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین دارند و آمینواسید شبه مایکوسپورین غالب در آنها به‌ویژه در آب‌های سطحی مایکوسپورین-گلیسین بود.

تحقیقات اخیر نشان داده است که موجودات فیتوپلانکتونی به‌ویژه جلبک‌های سبزآبی در هتروسیت خود، شینورین و پورفیرا-۳۳۴ را به‌عنوان یک پاسخ سازگاری، هنگام قرارگرفتن در معرض تابش‌های شدید پرتوهای فرابنفش، تولید می‌کنند. این دو آمینواسید شبه مایکوسپورین، علاوه بر فراهم کردن حفاظت در برابر پرتوهای فرابنفش، به‌همراه مایکوسپورین-گلیسین، دارای عملکردهای زیست‌فعال نظیر جذب رادیکال‌های آزاد، حفاظت در برابر استرس اکسیداتیو و تنظیم اسمزی بوده و همچنین موجب مهار فعالیت آنزیم کلاژناز و گلیکاسیون پروتئین‌ها می‌گردند (Kim et al., 2022).

طی تحقیق بر روی تغییرات ماهانه ساختار جوامع فیتوپلانکتونی دریاچه تار (ماه‌های گرم سال)، نرخ‌های تولید خالص متفاوتی از آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین در معرض تابش‌های طبیعی پرتوهای فرابنفش به ثبت رسید (شکل ۸) و مشخص گردید تغییرات ماهانه در غلظت آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین به‌صورت قابل توجه بر ساختار جامعه فیتوپلانکتونی تأثیرگذار است. گزارش‌های دیگر نیز نشان می‌دهند که سنتز آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین و القای نوری به‌شدت تحت تأثیر تغییرات فصلی در شدت تابش پرتوهای فرابنفش و تفاوت‌های بین‌گونه‌ای فیتوپلانکتون‌ها قرار دارد. در مطالعه حاضر، گونه غالب *D. pulchellum* بود (شکل ۷) و مشخص گردید که به تابش‌های طبیعی پرتوهای فرابنفش حساسیت بالایی دارد و قادر است طیف متنوعی از آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین تولید نماید. *D. pulchellum* یک گونه فیتوپلانکتونی با پراکنش جهانی است و گاه جمعیت‌های متراکم و تک گونه را در دریاچه‌ها تشکیل می‌دهند (Irfanullah and Moss, 2006). لازم به ذکر است که دریاچه تار دارای جمعیت قابل توجهی از کلادوسرها است که چراگران کارآمد فیتوپلانکتون‌های تک سلولی و بسیار ریز به‌شمار می‌آیند بنابراین در تمام نمونه‌برداری‌ها فرم عمدتاً کلنیال از *D. pulchellum* فرم غالب در دریاچه تار بود (شکل ۲). تحقیقات نشان داده است که *D. pulchellum* می‌تواند در سطوح نور پایین دوام بیاورد، اما احتمالاً در آب‌های تیره‌تر نمی‌تواند زندگی کند. بنابراین برتری *D. pulchellum* در دریاچه تار می‌تواند به‌وضوح به دارا بودن غلظت‌های بالا و تنوع آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین مربوط باشد (Oliveira et al., 2021).

نتیجه‌گیری نهایی

تنوع فصلی در سطوح آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین (MAAs) نشان می‌دهد که توانایی تولید و تجمع سطح بالاتری از این ضد آفتاب‌ها در پاسخ به دوره‌های افزایش پرتوهای شدید فرابنفش UVR و دما، در تمام طول سال در فیتوپلانکتون وجود دارد. این ترکیبات حفاظت نوری را در طول دوره‌های استرس‌های فیزیولوژیک ناشی از دریافت پرتوهای فرابنفش برعهده دارند، که ممکن است به‌ویژه در محیط‌های سخت، مانند دریاچه‌های کوهستانی، بسیار مهم باشد. در سلول‌های جوامع فیتوپلانکتونی دریاچه کوهستانی تار، مانند جوامع فیتوپلانکتونی برخی از دریاچه‌های آلپ که قبلاً مورد بررسی قرار گرفته‌اند، تحت تأثیر جذب پرتوهای فرابنفش آمینواسیدهای شبه مایکوسپورین (MAAs) تولید می‌شود تا از پرتوهای شدید این طیف نوری در دریاچه‌های کوهستانی به‌ویژه در ماه‌های گرم سال و به‌ویژه در مناطق نیمه‌گرمسیری محافظت کند.

References

- Bellinger, E.G., 1992. A key to common algae freshwater, estuarine and some coastal species. London: Institution of Water and Environmental Management.
- Boucar, M.C.M., Shen, L.Q., Wang, K., Zhang, Z.C., Qiu, B.S., 2021. UV-B irradiation enhances the production of unique mycosporine-like amino acids and carotenoids in the subaerial cyanobacterium *Pseudanabaena* sp. CCNU1. *European Journal of Phycology*, 56(3), 316-323. DOI: 10.1080/09670262.2020.1824019
- Carreto, J.I., Carignan, M.O., 2011. Mycosporine-like amino acids: relevant secondary metabolites. Chemical and ecological aspects. *Marine Drugs*, 9(3), 387-446. DOI: 10.3390/md9030387
- de Oliveira, D.G., Schneider, G., Itokazu, A.G., Costa, G.B., Rörig, L.R., Simonassi, J.C., Paes de Barros, M., Figueroa, F.L., Bonomi-Barufi, J. and Guimarães, M., 2021. Effects of ultraviolet radiation removal on algal communities in three high-elevation Brazilian (ultra) oligotrophic lakes. *Phycologia*, 60(5), 497-512. DOI: 10.1080/00318884.2021.1985886
- Ficek, D., Dera, J., Woźniak, B., 2013. UV absorption reveals mycosporine-like amino acids (MAAs) in Tatra Mountain Lake phytoplankton. *Oceanologia*, 55(3), 599-609. DOI: 10.5697/oc.55-3.599
- Franklin, L.A., 2002. The Ecological significance of Mycosporine- Like amino acids in Algae. *Journal of Phycology*, 38, 10-10. DOI: 10.1046/j.1529-8817.38.s1.28.x
- Geraldes, V., Pinto, E., 2021. Mycosporine-like amino acids (MAAs): Biology, chemistry and identification features. *Pharmaceuticals*, 14(1), 63. DOI: 10.3390/ph14010063
- Görünmek, M., Ballık, B., Çakmak, Z.E., Çakmak, T., 2024. Mycosporine-like amino acids in microalgae and cyanobacteria: Biosynthesis, diversity, and applications in biotechnology. *Algal Research*, 80, 103507. DOI: 10.1016/j.algal.2024.103507
- Ha, S.Y., Lee, Y., Kim, M.S., Kumar, K.S., Shin, K.H., 2015. Seasonal changes in mycosporine-like amino acid production rate with respect to natural phytoplankton species composition. *Marine Drugs*, 13(11), 6740-6758.
- Hasani, N., Mousavi-Nadushan, R., Fatemi, M.R., Danehkar, A., Ghavam Mostafavi, P., 2025. Deciphering effective environmental discriminators via allocation success of epibenthic diatoms across mangrove biosphere reserve, Persian Gulf, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(4), 2387-2408. DOI: 10.1007/s13762-024-05916-x
- Ghiyas Abadi, M., Mousavi Nadushan, R., Fatemi, M.R., Jozi, A., 2014. Assessment of Gahar Lake Trophic Status using TLI Index. *Journal of Marine Sciences and Technologies Research*, 8(4), 75-88.
- Irfanullah, H.M., Moss, B., 2006. Ecology of *Dictyosphaerium pulchellum* Wood (Chlorophyta, Chlorococcales) in a shallow, acid, Forest Lake. *Aquatic Ecology*, 40, 1-12. DOI: 10.1007/s10452-005-9011-5
- Kim, B.K., Park, M.O., Min, J.O., Kang, S.H., Shin, K.H., Yang, E.J., Ha, S.Y., 2022. The interplay of mycosporine-like amino acids between phytoplankton groups and northern krill (*Thysanoessa* sp.) in a high-latitude Fjord (Kongsfjorden, Svalbard). *Marine Drugs*, 20(4), 238. DOI: 10.3390/md20040238
- Korbee, N., Carrillo, P., Mata, M.T., Rosillo, S., Medina-Sánchez, J.M., Figueroa, F.L., 2012. Effects of ultraviolet radiation and nutrients on the structure-function of phytoplankton in a high mountain lake. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 1087-1098. DOI: 10.1039/c2pp05336e. Epub 2012 Apr 30.
- La Barre, S., Roullier, C., Boustie, J., 2014. Mycosporine- like amino acids (MAAs) in biological photosystems. *Outstanding Marine Molecules*, 333-360. DOI: 10.1002/9783527681501.ch15
- Laurion, I., Lami, A., Sommaruga, R., 2002. Distribution of mycosporine-like amino acids and photoprotective carotenoids among freshwater phytoplankton assemblages. *Aquatic Microbial Ecology*, 26(3), 283-294. DOI: 10.3354/ame026283
- Nandagopal, P., Steven, A.N., Chan, L.W., Rahmat, Z., Jamaluddin, H., Noh, N.I.M., 2021. Bioactive metabolites produced by cyanobacteria for growth adaptation and their pharmacological properties. *Biology* 10, 1061. DOI: 10.3390/biology10101061
- Peng, J., Guo, F., Liu, S., Fang, H., Xu, Z., Wang, T., 2023. Recent advances and future prospects of mycosporine-like amino acids. *Molecules*, 28(14), 5588.

- Punchakara, A., Prajapat, G., Bairwa, H.K., Jain, S., Agrawal, A., 2023. Applications of mycosporine-like amino acids beyond photoprotection. *Applied and Environmental Microbiology*, 89(11), e00740-23. DOI: 10.1128/aem.00740-23.
- Raj, S., Kuniyil, A.M., Sreenikethanam, A., Gugulothu, P., Jeyakumar, R.B., Bajhaiya, A.K., 2021. Microalgae as a source of mycosporine-like amino acids (MAAs); advances and future prospects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23), 12402. DOI: 10.3390/ijerph182312402
- Roohi-Shalmaee, N., Mousavi-Nadushan, R., Mostafavi, P.G., Shahbazzadeh, D., Pooshang Bagheri, K., 2020. Ecological adaptation of the Persian Gulf polychaete in a polluted area: proteomics concerning dominant defensive biomarkers. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 1937-1946. DOI: 10.1007/s13762-019-02508-y
- Sen, S., Mallick, N., 2021. Mycosporine-like amino acids: Algal metabolites shaping the safety and sustainability profiles of commercial sunscreens. *Algal Research*, 58, 102425. DOI: 10.1016/j.algal.2021.102425
- Shick, J.M., Dunlap, W.C., 2002. Mycosporine-like amino acids and related gadusols: biosynthesis, accumulation, and UV-protective functions in aquatic organisms. *Annual Review of Physiology*, 64(1), 223-262. DOI: 10.1146/annurev.physiol.64.081501.155802
- Singh, D.K., Pathak, J., Pandey, A., Rajneesh, Singh, V., Sinha, R.P., 2022. Purification, characterization and assessment of stability, reactive oxygen species scavenging and antioxidative potentials of mycosporine-like amino acids (MAAs) isolated from cyanobacteria. *Journal of Applied Phycology*, 34(6), 3157-3175. DOI: 10.1007/s10811-022-02832-w
- Sonntag, B., Kammerlander, B., Summerer, M., 2017. Bioaccumulation of ultraviolet sunscreen compounds (mycosporine-like amino acids) by the heterotrophic freshwater ciliate *Bursaridium* living in alpine lakes. *Inland Waters*, 7(1), 55-64. DOI: 10.1080/20442041.2017.1294348
- Tartarotti, B., Sommaruga, R., 2006. Seasonal and ontogenetic changes of mycosporine-like amino acids in planktonic organisms from an alpine lake. *Limnology and Oceanography*, 51(3), 1530-1541. DOI: 10.4319/lo.2006.51.3.1530
- Vega, J., Bárcenas-Pérez, D., Fuentes-Ríos, D., López-Romero, J.M., Hrouzek, P., Figueroa, F.L., Cheel, J., 2023. Isolation of mycosporine-like amino acids from red macroalgae and a marine lichen by high-performance countercurrent chromatography: A strategy to obtain biological UV-filters. *Marine Drugs*, 21(6), 357. DOI: 10.3390/md21060357
- Wear, J.D., R. Sheath, R.G., Kociolek, J.P. (Eds.). (2015). *Freshwater algae of North America: ecology and classification*. Academic Press.
- Weiss, E.L., Cape, M.R., Pan, B.J., Vernet, M., James, C.C., Smyth, T.J., Ha, S.Y., Iriarte, J.L., Mitchell, B.G., 2022. The distribution of mycosporine-like amino acids in phytoplankton across a Southern Ocean transect. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1022957. DOI: 10.3389/fmars.2022.1022957
- Whitehead, K., Karentz, D., Hedges, J., 2001. Mycosporine-like amino acids (MAAs) in phytoplankton, a herbivorous pteropod (*Limacina helicina*), and its pteropod predator (*Clione antarctica*) in McMurdo Bay, Antarctica. *Marine biology*, 139, 1013-1019.