

## واکاوی تغییرات مکانی شاخص‌های فیزیکی-شیمیایی و اثر آن‌ها بر تولید اولیه (کلروفیل-آ) در سواحل جنوبی دریای خزر با استفاده از مدل رگرسیون سلسله مراتبی

صدیقه ارجمندی<sup>۱</sup>، سمیه نهاوندیان<sup>۲\*</sup>، نعمت محمودی<sup>۳</sup>

۱- گروه فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۲- گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۳- گروه تکثیر و پرورش آبزیان، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

### چکیده

این مطالعه به بررسی تغییرات مکانی پارامترهای فیزیکوشیمیایی و نقش آن‌ها در پیش‌بینی کلروفیل-آ در سواحل جنوبی دریای خزر (بابلسر، نوشهر و رامسر) پرداخت. اندازه‌گیری‌ها در بهار ۱۳۹۱ با دستگاه CTD انجام و داده‌ها بر اساس استاندارد TEOS-10 اصلاح شدند. عمق لایه آمیخته با استفاده از روش آستانه بر پایه نیم‌رخ چگالی و با آستانه ۰/۵  $\text{kg.m}^{-3}$  محاسبه شد که تغییرات مکانی قابل توجهی از ۵ متر تا ۱۶ متر در مناطق مختلف نشان داد. نتایج نشان داد شوری، اکسیژن محلول و کلروفیل-آ تغییرات مکانی معناداری دارند. بالاترین شوری در بابلسر ( $13/95 \text{ g.kg}^{-1}$ ) با کمترین کلروفیل-آ و کمترین شوری در نوشهر ( $13/34 \text{ g.kg}^{-1}$ ) با بیشترین کلروفیل-آ مشاهده شد. مدل رگرسیون سلسله مراتبی به منظور تعیین میزان نقش پارامترهای مختلف در تعیین کلروفیل-آ، نشان داد شوری و دما پیش‌بین‌کننده‌های منفی و معنادار هستند و ۴۶/۳٪ از واریانس آن را تبیین می‌کنند. نتیجه‌گیری کلی حاکی از کنترل شدید تولید اولیه توسط عوامل فیزیکی مؤثر بر دسترسی مواد مغذی است.

### نوع مقاله

#### مقاله پژوهشی اصیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

تاریخ چاپ الکترونیکی:

۱۴۰۴/۱۲/۱۵

\*نویسنده مسئول:

s.nahavandian@modares.ac.ir

**کلیدواژه‌ها:** کلروفیل-آ، عمق لایه آمیخته، دما، شوری، جنوب شرقی دریای خزر

### مقدمه

اکوسیستم‌های آبی، به‌ویژه محیط‌های دریایی و ساحلی، نقش بی‌بدیلی در تنظیم شرایط زیستی سیاره زمین، تأمین امنیت غذایی و پشتیبانی از فعالیت‌های اقتصادی جوامع انسانی ایفا می‌کنند. این اکوسیستم‌ها نه تنها کانون اصلی تنوع زیستی هستند، بلکه به عنوان شاخص‌های حیاتی سلامت کره زمین، به سرعت به تغییرات محیطی پاسخ می‌دهند. پایداری و عملکرد این اکوسیستم پیچیده، شدیداً به تعادل دینامیک پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب وابسته است. در این بین، دما، شوری، اکسیژن محلول و غلظت کلروفیل-آ می‌تواند از جمله کلیدی‌ترین متغیرها دانست. دما به عنوان یک عامل کنترل‌کننده اصلی، بر نرخ متابولیسم موجودات، حلالیت گازها و الگوهای گردش آب تأثیر می‌گذارد. از طرفی اکسیژن محلول یک نیاز متابولیکی اساسی برای موجودات دریایی دگرپرورده (هتروتروف<sup>۱</sup>)، به غیر پستانداران دریایی، است<sup>[۱-۴]</sup>. غلظت اشباع اکسیژن به دما و شوری بستگی دارد<sup>[۵]</sup>. علاوه بر این پارامترها، غلظت اکسیژن محلول به سرعت فوتوسنتز و متعاقباً به غلظت مواد مغذی بستگی دارد. از طرفی شوری بر توزیع گونه‌های آبی و همچنین بر چگالی و لایه‌بندی ستون آب مؤثر است<sup>[۶-۸]</sup>. اکسیژن محلول شاخصی مستقیم از سلامت اکوسیستم

<sup>1</sup> Heterotroph

\* Corresponding Author:

Email address:

Tel:

© Published by Tarbiat Modares University

ISSN: 2322-5513

و شرط ضروری برای حیات بیشتر آبزیان محسوب شده و کاهش آن می‌تواند به ایجاد مناطق کم‌اکسیژن و مرده منجر گردد<sup>[۹]</sup>. در نهایت، کلروفیل-آ (Chl-a)<sup>۲</sup> به عنوان یک شاخص برای تولیدات اولیه<sup>۳</sup> و شکوفایی فیتوپلانکتون‌ها، پایه اصلی زنجیره غذایی در دریا، را نمایندگی می‌کند<sup>[۱۰،۹]</sup>. تغییرات هم‌زمان این پارامترها می‌تواند تصویری جامع از وضعیت بوم‌شناسی و تغییرپذیری یک پهنه آبی ارائه دهد. سیستم‌های دریایی و ساحلی، به عنوان بستر حیات جوامع انسانی متراکم و منبع تأمین معیشت، از اهمیت اقتصادی و اجتماعی بی‌بدیلی برخوردارند<sup>[۱۱]</sup>. از جمله عواملی که در رشد و تکثیر فیتوپلانکتون‌ها موثر بوده و آن را محدود می‌کند نور، دما، عمق لایه آمیخته و مواد مغذی است که دما، عمق لایه آمیخته و مواد مغذی متأثر از تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی هستند<sup>[۱۲،۱۵]</sup>. این اهمیت، لزوم شناخت عمیق فرآیندهای فیزیکی و بیوشیمیایی حاکم بر این محیط‌ها را برای مدیریت پایدار آنان اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. امروزه دریای خزر تحت تأثیر فشارهای متعدد طبیعی و انسانی از جمله تغییرات اقلیم جهانی، برداشت بی‌رویه از منابع زیستی، ورود آلاینده‌ها و نوسانات تراز آب قرار دارد. این عوامل می‌توانند تعادل ظریف بین پارامترهای کیفی آب را برهم زده و منجر به تغییر در ساختار و عملکرد بوم‌سازگان شوند.

با توجه به این ملاحظات، این پژوهش با هدف بررسی و تحلیل تغییرات مکانی پارامترهای کلیدی دما، شوری، عمق لایه آمیخته، اکسیژن محلول و کلروفیل آ در سه منطقه بابلسر، نوشهر و رامسر در شرق دریای خزر طراحی شده است. درک رابطه علی و معلولی میان این متغیرها نه تنها برای ارزیابی سلامت کنونی این اکوسیستم ارزشمند حیاتی است، بلکه مدل‌سازی تغییرات آتی و تدوین راهبردهای مدیریتی و حفاظتی پایدار برای این میراث طبیعی بی‌همتا را ممکن می‌سازد.

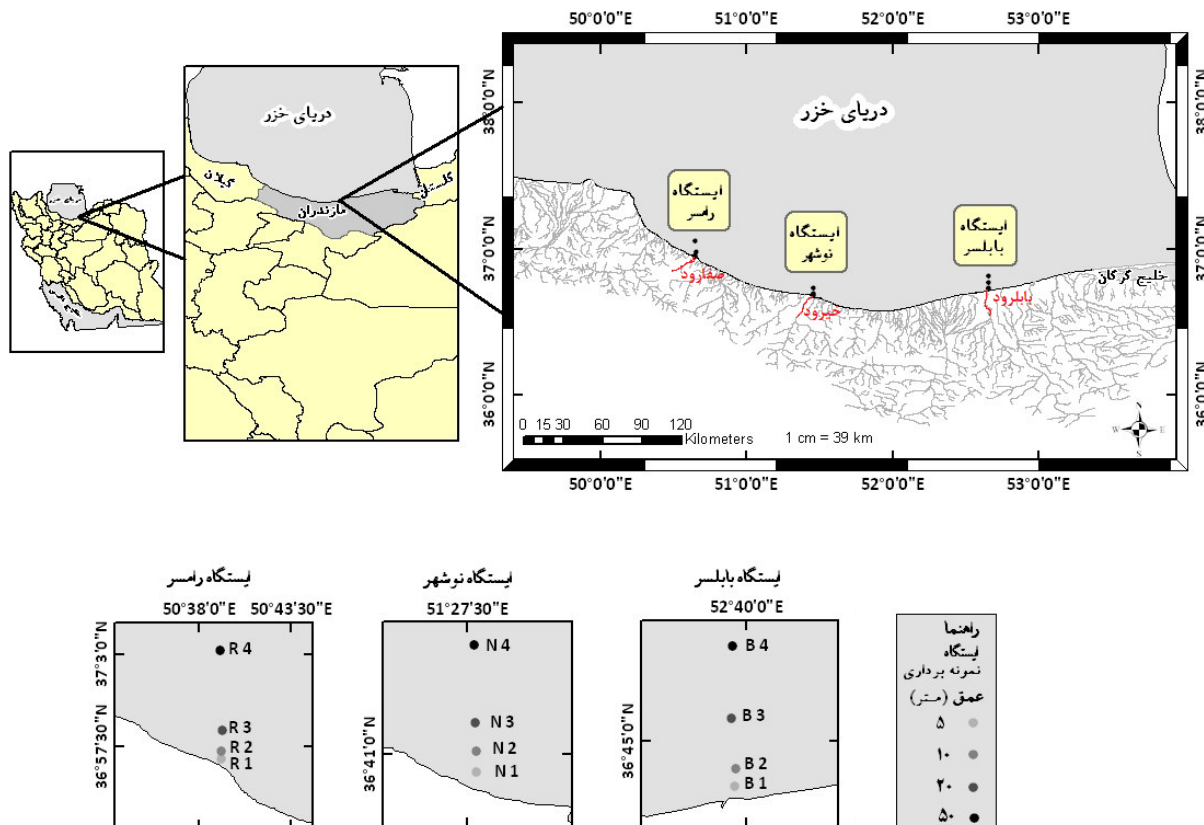
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و روش‌های نمونه‌برداری

مطالعه حاضر با استفاده از اندازه‌گیری‌های مکانی (منطقه بابلسر، نوشهر و رامسر) در فصل بهار سال ۱۳۹۱ انجام شد. برای اندازه‌گیری دما (°C)، شوری (g/l)، اکسیژن محلول (mg.L-1) و کلروفیل-آ (µg.L-1) از دستگاه (Idronaut Ocean Seven (316مد CTD مجهز به حسگرهای متعدد دیگر استفاده شد. از داده‌های دما و شوری برای محاسبه چگالی و عمق لایه مخلوط استفاده شد که در بخش بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت. در هر نمونه‌برداری، حسگرهای CTD کالیبره شده و سپس به عمق آب ارسال شدند. داده‌های ماهانه در چهار ایستگاه (۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ متر) در فواصل مختلف از خط ساحلی در اعماق نمونه‌برداری مختلف جمع‌آوری شدند (شکل ۱). جزئیات اندازه‌گیری شامل مکان، تاریخ، ساعت اندازه‌گیری، و همچنین میانگین روزانه شرایط آب و هوایی شامل دما، بارش، و سرعت باد در جدول ۱ ارائه شده است. داده‌ها در فواصل زمانی ۱ ثانیه ثبت و با نرم‌افزار Hyperterminal به کامپیوتر منتقل شدند. عمق‌های مشخص شده در زیرشکل پایین سمت راست، عمق‌های میانگین‌گیری شده پارامترهای مورد نظر را نشان می‌دهند. نمونه‌برداری در هر ایستگاه در چهار عمق ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ متری به شرح زیر انجام شد: ایستگاه ۱ (۵ متر): در اعماق ۰ و ۵ متر، ایستگاه ۲ (۱۰ متر): در اعماق ۰، ۵ و ۱۰ متر، ایستگاه ۳ (۲۰ متر): در اعماق ۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ متر و ایستگاه ۴ (۵۰ متر): در اعماق ۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ متر. برای تعیین موقعیت جغرافیایی منطقه از دستگاه GPS (Garmin) و برای اندازه‌گیری عمق آب در هر ایستگاه از دستگاه اکوساندر (Speedtech) استفاده شد.

<sup>2</sup> Chlorophyll-a

<sup>3</sup> Primary Production



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های اندازه‌گیری به تفکیک عمق از شرق به غرب همراه با برش‌های عرضی بابلسر، نوشهر و رامسر، نام رودخانه‌ها در شکل با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.

جدول ۱. جزئیات اندازه‌گیری (مکان، تاریخ، ساعت اندازه‌گیری)، میانگین روزانه شرایط آب و هوایی (دما، بارش، سرعت باد)

مکان	تاریخ	ساعت اندازه‌گیری	شرایط آب و هوایی (میانگین روزانه)		
			دما (°C)	بارش (mm)	سرعت باد (m/s)
بابلسر	۲۸/۰۳/۱۳۹۰	۱۶:۴۵-۲۰	۲۶/۶	۰	۲/۴
نوشهر	۰۴/۰۳/۱۳۹۱	۸:۵۰-۱۵:۳۰	۲۲/۲	۰/۱۲۵	۱/۱۲۵
رامسر	۲۵/۰۳/۱۳۹۱	۹:۴۰-۱۷:۳۰	۲۵/۸	۰	۱/۱

### محاسبه شوری و چگالی

با توجه به ترکیب یونی متفاوت دریای خزر در مقایسه با اقیانوس‌ها و آب‌های آزاد، داده‌های خام شوری به‌دست‌آمده توسط CTD نیاز به اصلاحاتی دارند. شوری ثبت شده توسط دستگاه CTD از طریق رسانایی و از طریق فرمول‌بندی معادله حالت بین‌المللی ۱۹۸۰ (EOS-80) به‌دست می‌آید.

آید [۱۱،۱۳]. استاندارد جدیدی با در نظر گرفتن آنتروپی، انرژی داخلی و آنتالپی در سال ۲۰۱۰ (TEOS-10) برای محاسبه خواص ترمودینامیکی آب دریا ارائه شد که محاسبه شوری را نیز در این فرمول‌بندی شامل می‌شود<sup>۱۱</sup> طبق فرمول‌بندی جدید، به جای پارامتر بدون بعد شوری کاربردی (SP؛ یعنی شوری اندازه‌گیری شده توسط دستگاه با واحد PSU)، از شوری مطلق در واحد  $g.kg^{-1}$  استفاده می‌شود. در این روش، برای محاسبه شوری، شوری مرجع (SR) با استفاده از معادله زیر (۱) محاسبه می‌شود و سپس شوری مطلق (SA) با استفاده از الگوریتم مربوط به دریاهای آزاد تعیین می‌شود [۱۶-۱۸].

$$S_R = (35.16504/35) \times S_P \quad (۱)$$

$$S_A = 1.228 \times S_R \quad (۲)$$

علاوه بر شوری، اصلاحاتی برای چگالی دریای خزر نیز مورد نیاز است. همانطور که قبلاً ذکر شد<sup>۱۹</sup>، ذکر شد، چگالی پتانسیل ( $\sigma_\theta$ ) طبق روش ارائه شده<sup>۱۸</sup> و فرمول ارائه شده در فرمول‌بندی TEOS-10 محاسبه شد. در آن ضریب شوری (معادله ۲) از اندازه‌گیری‌های انجام شده در دریای خزر<sup>۲۰</sup> تعیین شد.

### تخمین عمق لایه آمیخته

در مطالعه حاضر، عمق لایه مخلوط با استفاده از روش آستانه محاسبه می‌شود. در این روش، MLD عمقی است که در آن پارامتر مورد نظر (در این مطالعه، چگالی) از یک مقدار از پیش تعریف شده یا مقدار آستانه نسبت به عمق مرجع (در این مطالعه عمق ۱ متر) فراتر می‌رود. به عبارت دیگر، MLD کمترین عمقی است که در آن  $|\sigma_{\theta_i} - \sigma_{\theta}(d_0)| \geq Th_{\sigma_\theta}$  است، که در آن  $d_0 = 1m$  و  $Th_{\sigma_\theta}$  مقدار آستانه در نیم‌رخ چگالی است که بسته به منطقه مورد مطالعه و پارامتر مورد نظر می‌تواند متفاوت باشد. در مطالعه‌ای که توسط Kara و همکاران (۲۰۰۰)<sup>۲۱</sup> انجام شد، آستانه مورد استفاده برای تخمین عمق لایه آمیخته بر پایه دما  $0.8$  و در مطالعه Monterey و Levitus (۱۹۹۷)<sup>۲۲</sup>،  $0.5$  ( $^{\circ}C$ ) پیشنهاد شد. بر اساس نتایج گزارش شده در مطالعه‌ای که توسط de Boyer Montégut و همکاران (۲۰۰۴)<sup>۲۳</sup> انجام شد، این مقادیر، MLD را بیش از واقعیت تخمین می‌زند. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که هیچ مقدار آستانه‌ی منحصر به فردی برای همه اقیانوس‌ها و دریاهای محاسبه‌ی MLD وجود ندارد و هر منطقه، دریا یا اقیانوس ممکن است بسته به تغییرات در ویژگی‌های پروفیل، مقدار آستانه‌ی خاص خود را داشته باشد. در مطالعه‌ای که توسط Nahavandian و همکاران (۲۰۲۲)<sup>۱۹</sup> در جنوب شرقی دریای خزر انجام شد، آستانه‌هایی که نزدیک‌ترین تخمین MLD به واقعیت را می‌دهند، به ترتیب برای دما و چگالی  $1$  ( $^{\circ}C$ ) و  $0.5$  ( $kg.m^{-3}$ ) معرفی شدند. در مطالعه‌ی حاضر، آستانه‌ی  $0.5$  ( $kg.m^{-3}$ ) نیز برای تخمین MLD استفاده شد.

### روش‌های تحلیل

در این تحقیق، از آنالیز واریانس یک طرفه (آنالیز واریانس<sup>۴</sup>) با آزمون‌های تعقیبی برای بررسی اینکه آیا تفاوت‌های آماری معنی‌داری بین میانگین‌های یک متغیر مستقل طبقه‌بندی شده (در اینجا دما، شوری، اکسیژن محلول و کلروفیل-آ) با سه یا چند سطح (منطقه مورد مطالعه) وجود دارد یا خیر، استفاده شده است. این روش واریانس درون گروه‌ها را با واریانس بین گروه‌ها مقایسه می‌کند تا ارزیابی کند که آیا تفاوت‌های مشاهده شده ناشی از شانس تصادفی یا اثر واقعی متغیرهای مورد نظر است. آنالیز واریانس یک طرفه یک آزمون چند متغیره است که تفاوت کلی بین میانگین‌های چندین گروه را ارزیابی می‌کند. اگر آزمون آنالیز واریانس معنی‌دار باشد ( $p < 0.05$ )، تجزیه و تحلیل‌های تعقیبی برای بررسی

<sup>4</sup> ANOVA (analysis of variance)

مقایسه‌های جفتی انجام خواهد شد. علاوه بر این، از آنجایی که آزمون آنالیز واریانس فرض همگنی واریانس را در نظر می‌گیرد، از آزمون لون<sup>۵</sup> برای ارزیابی اینکه آیا این فرض وجود دارد یا خیر، استفاده می‌شود. اگر فرض همگنی واریانس معتبر باشد، آزمون HSD توکی<sup>۶</sup> به عنوان یک آزمون آماری پس‌آزمون برای تعیین اینکه کدام گروه‌های خاص تفاوت معناداری دارند، اعمال خواهد شد. در غیر این صورت، آزمون Games-Howell<sup>۷</sup> به عنوان یک آزمون پس‌آزمون قوی‌تر و ناپارامتری برای مقایسه میانگین گروه‌ها اعمال خواهد شد<sup>[۲۵،۲۴]</sup>. اندازه اثر به صورت مجذور اتا ( $\eta^2$ ) نیز به منظور محاسبه نسبت واریانس در متغیر وابسته به واریانس بین گروه‌های متغیر مستقل، که نشان‌دهنده بزرگی تفاوت میان گروه‌های مختلف است، محاسبه شده است. دامنه تغییرات  $\eta^2$  بین ۰ و ۱ است؛ مقادیر نزدیک‌تر به ۱ نشان می‌دهد که متغیر مستقل نسبت بیشتری از واریانس متغیر مستقل مورد نظر را توضیح می‌دهد.

## نتایج

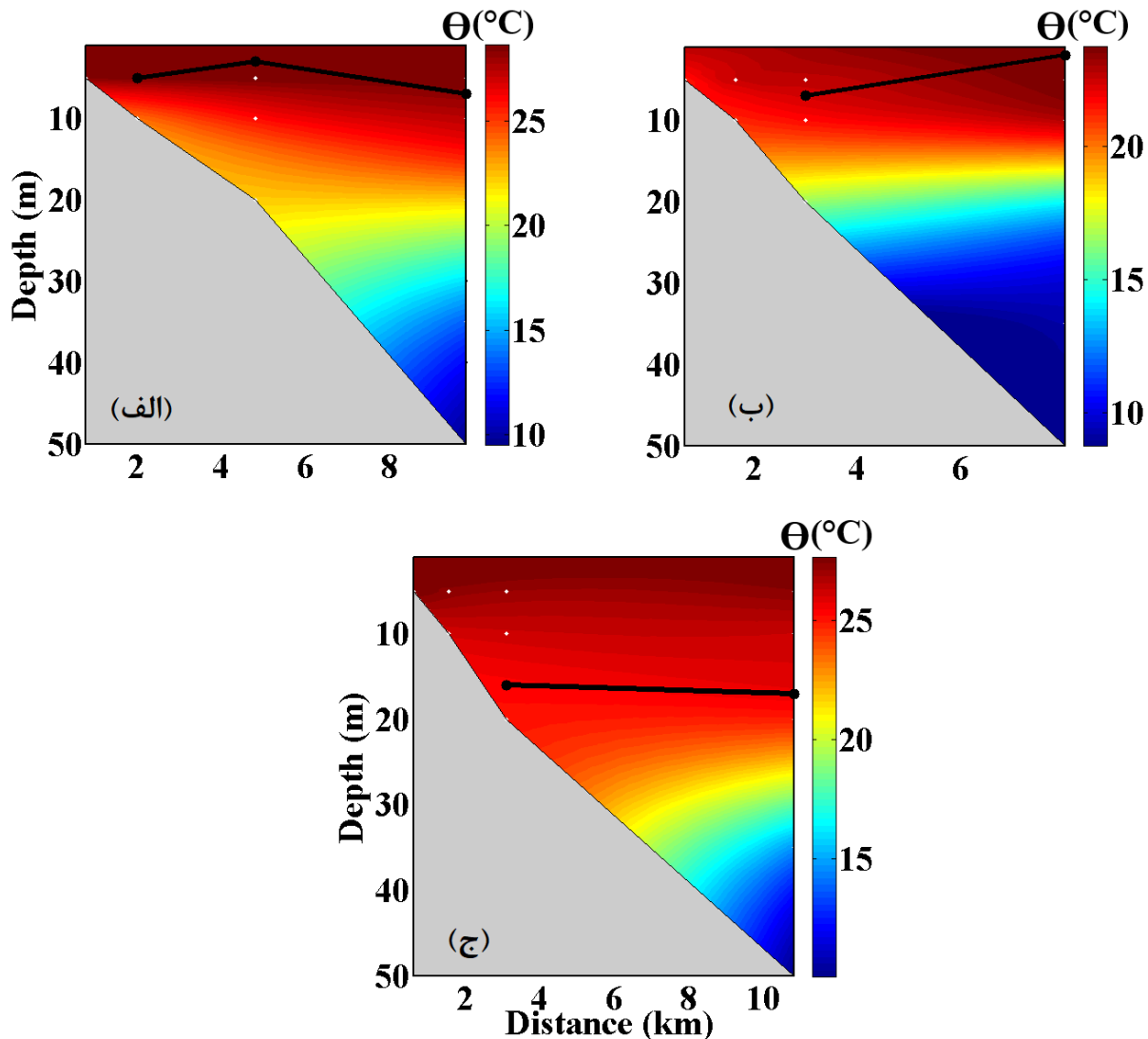
### تغییرات مکانی پارامترهای محیطی

تغییرات مکانی دمای پایستار<sup>۷</sup> در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ الف نشان داده شده است، در فصل بهار،  $\Theta$  در بابلسر حداکثر مقدار خود را در نزدیکی سطح  $28.7^\circ\text{C}$  و حداقل مقدار آن را در لایه عمیق  $8.2^\circ\text{C}$  دارد. میانگین MLD در ۳ ایستگاه که شاهد شکل‌گیری پیکنوکالین در آن‌ها هستیم، حدود ۵ m و میانگین دما در لایه آمیخته ( $\Theta\text{MLD}$ ) حدود  $28.7^\circ\text{C}$  در میانگین MLD در نوشهر (شکل ۲ ب) نیز حدود ۵ m و میانگین دما در لایه آمیخته ( $\Theta\text{MLD}$ ) حدود  $22.4^\circ\text{C}$  در رامسر MLD از دو منطقه دیگر عمیق‌تر حدود ۱۶ m و دمای آن  $26/3^\circ\text{C}$  است. در تمام مناطق دمای ترموکالین بین  $10-25^\circ\text{C}$  و در لایه عمیق کمتر از  $10^\circ\text{C}$  است.

<sup>5</sup> Levene's Test

<sup>6</sup> Tukey's HSD (Honestly Significant Difference)

<sup>7</sup> Conservative temperatuer



شکل ۲. تغییرات مکانی دمای پایستار در برش عرضی از نزدیک ساحل به دور از ساحل در (الف) بابلسر، (ب) نوشهر و (ج) رامسر؛ محور افقی در شکل‌ها نشان‌دهنده فاصله از ساحل یا است و محور عمودی عمق آب و بخش رنگی نمودار نشان‌دهنده هم‌خط<sup>۸</sup> دما است که توسط نواررنگ<sup>۹</sup> در کنار شکل‌ها نشان داده شده است. نقاط سیاه رنگ نشان‌دهنده عمق لایه آمیخته در ایستگاه‌ها است.

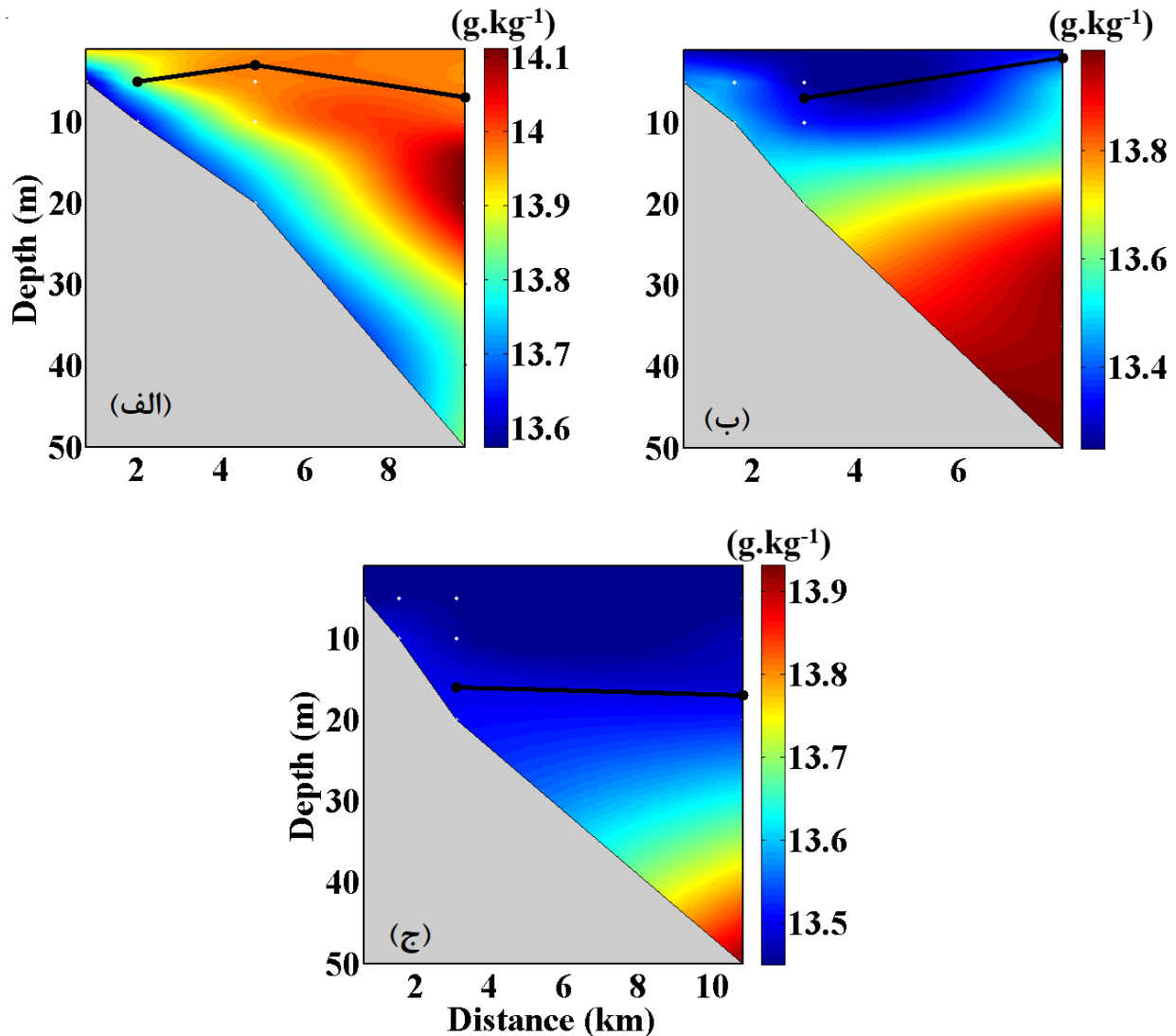
به منظور ارزیابی تفاوت معنادار آماری میانگین دمای پایستار بهاری میان سه منطقه فلات قاره مورد نظر (بابلسر، نوشهر و رامسر)، از تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) استفاده شد. فرض همگنی واریانس‌ها با استفاده از آزمون لون مورد آزمایش قرار گرفت. نتیجه غیرمعنی‌دار ( $p = 0.899$ ) تأیید کرد که واریانس‌ها در بین گروه‌ها تفاوت معنی‌داری ندارند و استفاده از ANOVA استاندارد را تأیید نمی‌کند. به همین منظور از تحلیل پس از آزمون (Games-Howell) به منظور بررسی مقایسه‌های جفتی که در روند کلی نقش داشتند، انتخاب شد. همانطور که انتظار می‌رفت، با توجه به آزمون اصلی غیرمعنی‌دار، هیچ یک از مقایسه‌های جفتی در سطح  $\alpha = 0.05$  به معناداری آماری نرسیدند. همچنین آزمون قوی‌تر (Welch and Brown-Forsythe) یافته‌های پیشین را تأیید کردند و نتایج غیرمعنی‌داری به دست دادند ( $p = 0.085$  Welch)؛

<sup>۸</sup> Contour

<sup>۹</sup> Colorbar

آمارى معنی‌دار نیستند.  $(p = 0/086)$  Brown-Forsythe. این سازگاری در بین آزمون‌ها، این نتیجه‌گیری را تقویت می‌کند که تفاوت‌های دمایی مشاهده شده از نظر

تغییرات مکانی شوری مطلق ۱۰ در شکل ۳ نشان داده شده است. با نگاه اجمالی شاهد تفاوت ساختار شوری مطلق در سه منطقه مورد مطالعه هستیم، هرچند باید توجه داشت که گستره تغییرات شوری اندک است. که در شکل ۳ الف نشان داده شده است، در فصل بهار،  $SA$  در بابلسر حداکثر مقدار خود را در نزدیکی سطح  $1\text{ g.kg}^{-1}$  و بیشترین مقدار آن را در لایه عمیق  $1\text{ g.kg}^{-1}$   $14/25$  دارد. میانگین شوری در لایه آمیخته (SAML) حدود  $1\text{ g.kg}^{-1}$   $13/95$ ، شوری لایه آمیخته (SAML) در نوشهر (شکل ۳ ب) نیز حدود  $1\text{ g.kg}^{-1}$   $13/34$ ، در رامسر شوری لایه آمیخته  $1\text{ g.kg}^{-1}$   $13/55$  است. در تمامی مناطق لایه‌بندی در نیم‌رخ شوری دیده می‌شود و از نظر اجمالی به نظر می‌آید شوری در ستون آب در بابلسر کمی بیشتر از دو منطقه دیگر است.



شکل ۳. تغییرات مکانی شوری مطلق در برش عرضی از نزدیک ساحل به دور از ساحل در (الف) بابلسر، (ب) نوشهر و (ج) رامسر؛ محور افقی در شکل‌ها نشان‌دهنده فاصله از ساحل یا است و محور عمودی عمق آب و بخش رنگی نمودار نشان‌دهنده هم‌خط دما است که توسط نوار رنگ در کنار شکل‌ها نشان داده شده است. نقاط سیاه رنگ نشان‌دهنده عمق لایه آمیخته در ایستگاه‌ها است.

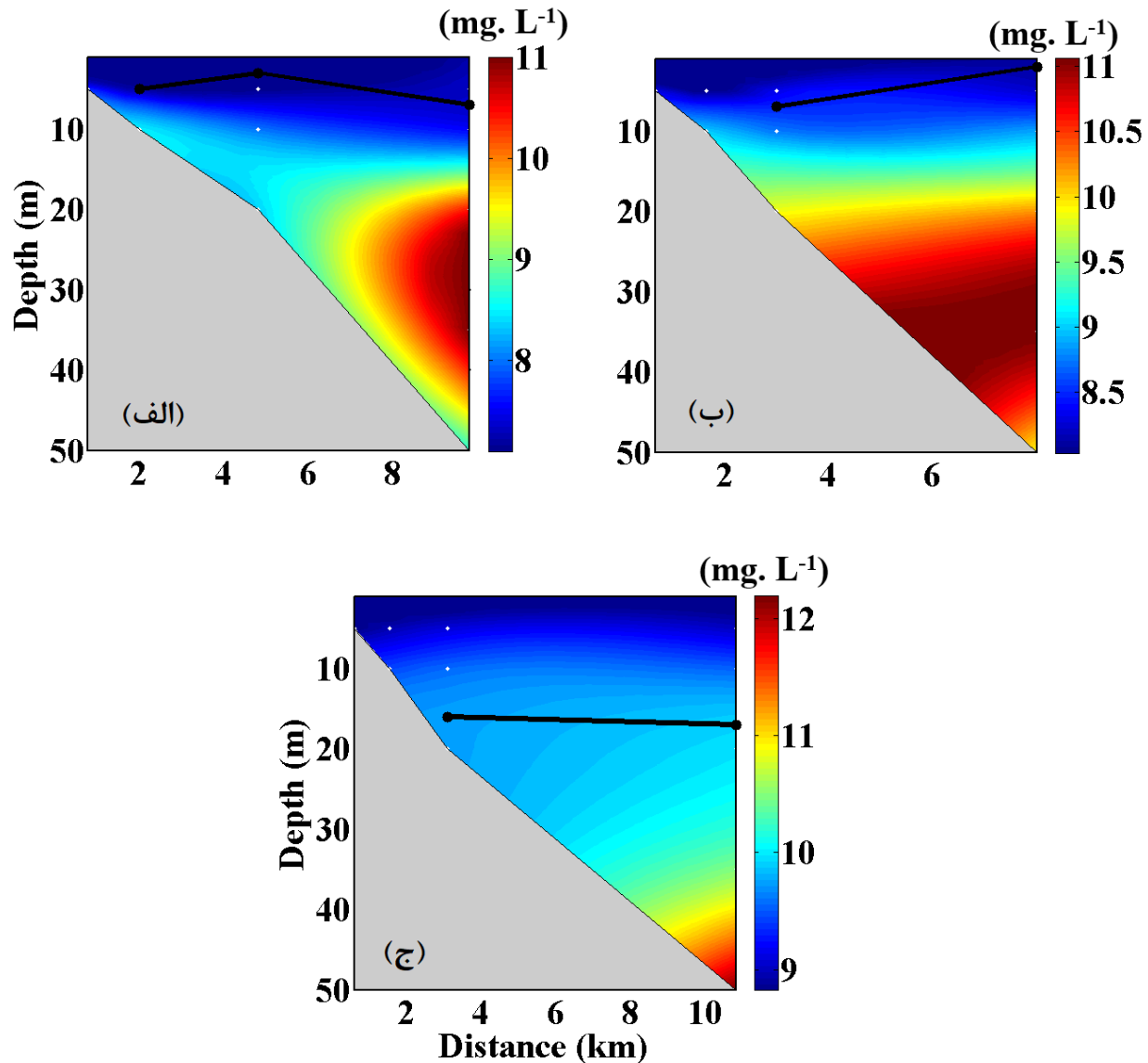
به منظور انجام آنالیز واریانس یک طرفه (ANOVA) بر روی شوری مطلق (SA) در میان سه منطقه نمونه‌برداری (بابلسر، نوشهر و رامسر)، آزمون لون مورد آزمایش قرار گرفت که نتیجه غیرمعنی‌دار ( $p = 0.166$ ) نشان داد که واریانس‌ها در بین گروه‌ها تفاوت معنی‌داری ندارند، بنابراین این فرض برای آنالیز واریانس استاندارد برآورده می‌شود. از لحاظ آماری آنالیز واریانس معنی‌داری بود،  $F(2, 30) = 9.073$ ،  $p = 0.001$ . این نشان می‌دهد که تفاوت‌های معنی‌داری در میانگین شوری مطلق بهاره میان حداقل دو مورد از سه مکان نمونه‌برداری وجود دارد. به منظور مقایسه‌های دقیق‌تر زوجی میان SA مناطق مختلف تحلیل پس از آزمون انجام گرفت. از آنجا که آزمون لون پذیرفته شد، آزمون پس از آزمون Tukey HSD انجام شد. نتایج تفاوت معنی‌داری میان بابلسر و نوشهر نشان می‌دهد (میانگین تفاوت‌ها  $0.277$ ،  $p = 0.005$ ) میانگین شوری در بابلسر به طور معنی‌داری بیشتر از نوشهر بود. همچنین میان بابلسر و رامسر نیز تفاوت معنی‌داری مشاهده شد (میانگین تفاوت  $0.319$ ،  $p = 0.001$ ) میانگین شوری در بابلسر به طور معنی‌داری بیشتر از رامسر بود. از طرفی هیچ تفاوت معنی‌داری میان نوشهر و رامسر مشاهده نشد (میانگین اختلاف  $0.42$ ،  $p = 0.865$ ) خروجی زیرمجموعه‌های همگن به دست آمده از آزمون Tukey HSD

رامسر و نوشهر را در زیرمجموعه ۱ و بابلسر را به تنهایی در زیرمجموعه ۲ قرار می‌دهد. این امر تأیید می‌کند که بابلسر یک گروه آماری متمایز و با شوری بالاتر از بقیه مناطق را تشکیل می‌دهد.

تغییرات مکانی اکسیژن محلول<sup>۱۱</sup> (DO) در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ الف نشان داده شده است، در فصل بهار، DO در بابلسر کمینه مقدار خود را در نزدیکی سطح  $7/10 \text{ mg.L}^{-1}$  و بیشینه مقدار آن را در لایه عمیق  $11 \text{ mg.L}^{-1}$  دارد. میانگین DO در لایه آمیخته (DOMLD) حدود  $7/24 \text{ mg.L}^{-1}$ ، در حالیکه میانگین DO در لایه آمیخته (DOMLD) در نوشهر حدود  $8/29 \text{ mg.L}^{-1}$  و در رامسر میانگین DO در لایه آمیخته (DOMLD) معادل  $9/8 \text{ mg.L}^{-1}$  است. در تمام مناطق کمینه مقدار DO در سطح مشاهده می‌شود و با افزایش عمق افزایش می‌یابد و در بستر به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

---

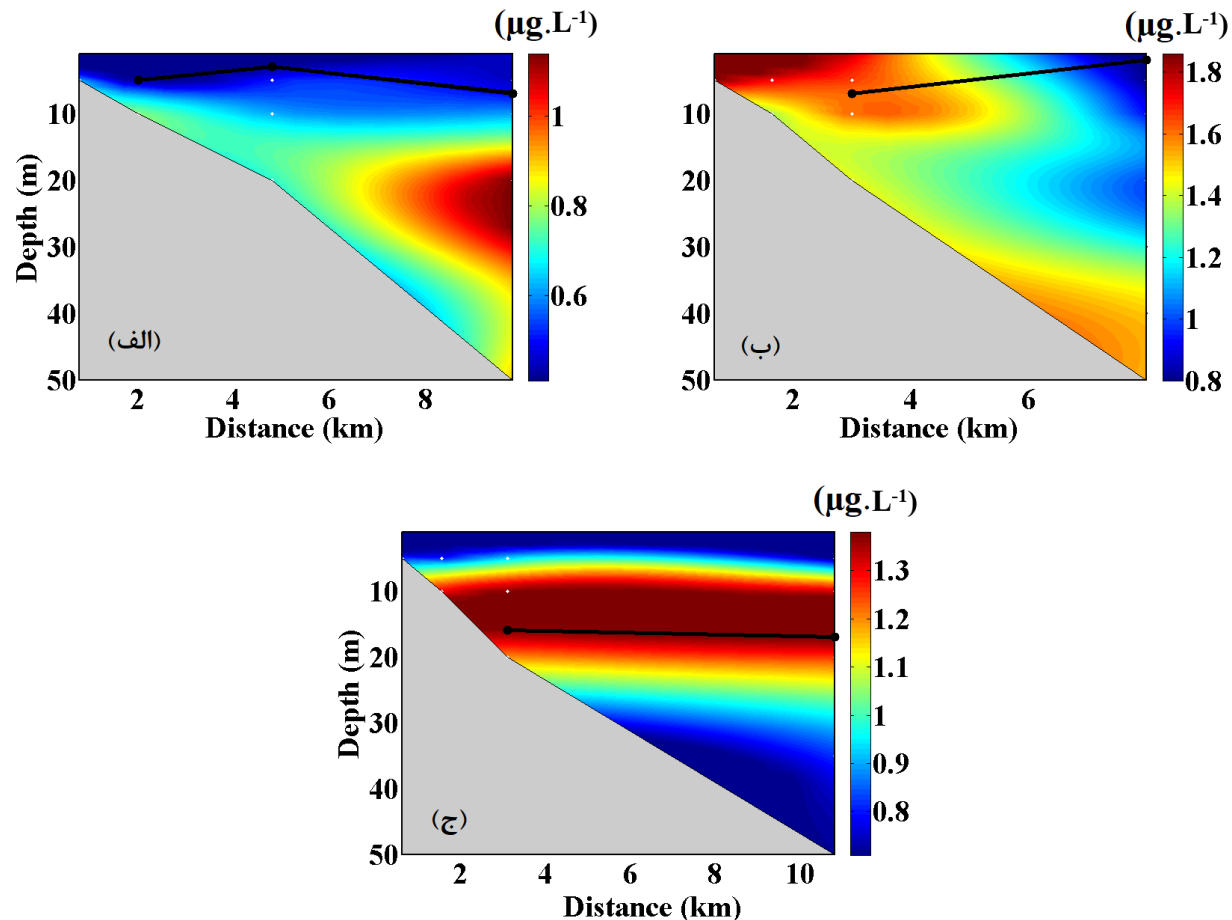
<sup>11</sup> Dissolved Oxygen (DO)



شکل ۴. تغییرات مکانی اکسیژن محلول مطلق در برش عرضی از نزدیک ساحل به دور از ساحل در (الف) بابلسر، (ب) نوشهر و (ج) رامسر؛ محور افقی در شکل‌ها نشان‌دهنده فاصله از ساحل یا است و محور عمودی عمق آب و بخش رنگی نمودار نشان‌دهنده هم‌خط دما است که توسط نواررنگ در کنار شکل‌ها نشان داده شده است. نقاط سیاه رنگ نشان‌دهنده عمق لایه آمیخته در ایستگاه‌ها است.

فرض همگنی واریانس‌ها با استفاده از آزمون لون به منظور انجام آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) برای تعیین میزان تفاوت آماری معنی‌دار در میانگین غلظت اکسیژن محلول (DO) در میان سه منطقه بابلسر، نوشهر و رامسر مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه غیرمعنی‌دار ( $p = 0.566$ ) تأیید کرد که واریانس‌ها در بین گروه‌ها تفاوت معنی‌داری ندارند و استفاده از آنالیز واریانس استاندارد بلامانع است. آنالیز واریانس یک‌طرفه نتیجه آماری معنی‌داری را نشان داد ( $p = 0.022$ ,  $F(2, 30) = 4.355$ ) که نشان از تفاوت‌های معنی‌دار در میانگین DO میان حداقل دو منطقه نمونه‌برداری است. به منظور بررسی اختلاف زوجی مکانی DO، آزمون پس‌آزمون توکی (Tukey HSD) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری میان اکسیژن محلول در بابلسر و نوشهر وجود ندارد ( $p = 0.218$ )، در صورتی که میان بابلسر و رامسر اختلاف معنی‌دار وجود دارد ( $p = 0.017$ ). همچنین، مقایسه نوشهر و رامسر اختلاف آماری معنی‌داری را نشان نداد ( $p = 0.447$ ). به عبارت دیگر، اگرچه میانگین DO در رامسر بیشتر از نوشهر بود، اما این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نبود و این دو منطقه در یک گروه آماری قرار می‌گیرند.

تغییرات کلروفیل در بابلسر در سطح کمترین و در زیر لایه آمیخته شروع به افزایش می‌کند و در ترموکلاین به بیشینه مقدار خود می‌رسد (شکل ۵). در نوشهر بیشینه مقدار کلروفیل در نزدیک به ساحل مشاهده شد و در دور از ساحل در نزدیک سطح کمترین مقدار و در عمق به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در رامسر مانند بابلسر به طور یک‌دست در تمام ایستگاه‌ها در نزدیک سطح کمترین و در نزدیک MLD به بیشینه مقدار خود می‌رسد و در اعماق بیشتر از MLD مجدد شروع به کاهش می‌کند و در نزدیک بستر مجدد به کمترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵. تغییرات مکانی اکسیژن محلول مطلق در برش عرضی از نزدیک ساحل به دور از ساحل در (الف) بابلسر، (ب) نوشهر و (ج) رامسر؛ محور افقی در شکل‌ها نشان‌دهنده فاصله از ساحل یا است و محور عمودی عمق آب و بخش رنگی نمودار نشان‌دهنده هم‌خط دما است که توسط نواررنگ در کنار شکل‌ها نشان داده شده است. نقاط سیاه رنگ نشان‌دهنده عمق لایه آمیخته در ایستگاه‌ها است.

آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) برای تعیین اینکه آیا تفاوت‌های آماری معنی‌داری در میانگین غلظت کلروفیل آ میان سه منطقه نمونه‌برداری شامل بابلسر، نوشهر و رامسر وجود دارد یا خیر، انجام شد. همان‌طور که پیش‌تر نیز توضیح داده شد، قبل از انجام آنالیز واریانس، فرض همگنی واریانس‌ها با استفاده از آزمون لون بررسی شد. نتیجه غیرمعنی‌دار ( $p = 0.293$ ) نشان داد که واریانس‌ها در سه گروه تفاوت معنی‌داری نداشتند، بنابراین این فرض کلیدی برای ANOVA استاندارد برآورده می‌شود. نتایج ANOVA از نظر آماری معنی‌داری را نشان داد،  $F(2, 30) = 16.895$ ،  $p < 0.001$  که نشان می‌دهد که حداقل در دو منطقه تفاوت معنی‌داری در میانگین غلظت کلروفیل-آ وجود دارد.

به منظور شناسایی اینکه کدام جفت‌های خاص از مناطق متفاوت هستند، آزمون پس آزمون Tukey HSD انجام شد. با توجه به اینکه فرض همگنی واریانس رعایت شده است، آزمون Tukey HSD مناسب‌ترین آزمون برای تفسیر است. نتایج آزمون نشان می‌دهد تفاوت بسیار معنی

داری میان بابلسر و نوشهر وجود دارد و میانگین غلظت کلروفیل-آ در بابلسر به طور قابل توجهی کمتر از نوشهر بود. از طرفی تفاوت معنی داری میان بابلسر و رامسر مشاهده شد. به طوری که میانگین غلظت کلروفیل-آ در بابلسر به طور قابل توجهی کمتر از رامسر بود و میانگین غلظت کلروفیل-آ در نوشهر به طور قابل توجهی بالاتر از رامسر بود.

### رگرسیون سلسله مراتبی محرک‌های محیطی بر کلروفیل-آ

رگرسیون چندگانه سلسله مراتبی برای ارزیابی توانایی سه متغیر محیطی - دمای پایستار ( $\Theta$ )، شوری مطلق (SA) و اکسیژن محلول (DO) برای پیش‌بینی غلظت کلروفیل-آ (Chla) انجام شد. ترتیب ورود متغیرها به طور سیستماتیک تغییر داده شد تا واریانس توسط هر پیش‌بینی‌کننده تعیین شود. مدل نهایی، که شامل هر سه پیش‌بینی‌کننده بود، از نظر آماری معنی‌دار بود، به طوری که  $F(3, 29) = 8.337$ ،  $p < 0.001$  و  $R^2 = 0.463$  از واریانس در Chla را توضیح داد ( $R^2$  تعدیل شده =  $0.408$ ).  $R^2$  معمولی همیشه با اضافه کردن هر متغیر جدید (حتی اگر بی فایده باشد) افزایش می‌یابد، که این خصوصیت می‌تواند گمراه‌کننده باشد. در حالی که  $R^2$  تعدیل شده فقط زمانی افزایش می‌یابد که متغیر جدید واقعاً مفید باشد. اگر متغیر جدید کمکی نکند، حتی ممکن است  $R^2$  تعدیل شده کاهش یابد. به عنوان مثال در مدل نهایی حاضر  $R^2 = 0.463$ ، در حالی که  $R^2$  تعدیل شده =  $0.408$  است. توالی ورود متغیرها، سلسله مراتب واضحی را در قدرت مدل نشان می‌دهد (جدول ۲). همان‌طور که در جدول قابل مشاهده است، زمانی که SA در مرحله اول به تنهایی وارد شد، یک پیش‌بینی‌کننده معنادار بود ( $\Delta R^2 = 0.207$ ،  $p = 0.008$ )، که بیش از ۲۰٪ از واریانس Chla را توضیح می‌داد. افزودن دمای پایستار ( $\Theta$ ) و اکسیژن محلول (DO) در مرحله دوم منجر به افزایش معنادار واریانس توضیح داده شده شد ( $\Delta R^2 = 0.256$ ،  $p = 0.004$ ). در مقابل، وقتی ( $\Theta$ ) ابتدا وارد شد، تنها ۳٪ از واریانس را توضیح داد ( $\Delta R^2 = 0.093$ ،  $p = 0.085$ ) و زمانی که DO ابتدا وارد شد، سهم آن به تنهایی معنادار نبود ( $\Delta R^2 = 0.084$ ،  $p = 0.102$ ).

جدول ۲. خلاصه مدل برای پیش‌بینی رگرسیون سلسله مراتبی کلروفیل-آ

Model	Predictors Entered	R <sup>2</sup>	$\Delta R^2$	Sig. of $\Delta F$	Final Model F	Final Model Sig.
1	First SA, Then $\Theta$ +DO	0.463	0.256	0.004	8.337	< 0.001
2	First $\Theta$ , Then SA+DO	0.463	0.371	< 0.001	8.337	< 0.001
3	First DO, Then SA+ $\Theta$	0.463	0.379	< 0.001	8.337	< 0.001

با توجه به نتایج به دست آمده SA ( $\beta = -0.651$ ،  $p < 0.001$ ) و دمای پایستار ( $\beta = -0.525$ ،  $p = 0.013$ ) هر دو پیش‌بینی‌کننده‌های منفی و معنی‌داری برای Chla بودند. در مقابل، اکسیژن محلول پیش‌بینی‌کننده معنی‌داری در مدل کامل نبود ( $\beta = 0.024$ ،  $p = 0.898$ ). از طرفی افزودن DO منجر تغییر قابل توجهی در  $R^2$  نشد، که تأیید می‌کند این پارامتر در تعیین Chla نقش قابل توجهی بازی نمی‌کند. بررسی همخطی، همبستگی متوسطی را بین پیش‌بینی‌کننده‌ها، به ویژه بین  $\Theta$  و DO نشان داد. مقادیر ضریب تورم واریانس (VIF) در مدل کامل از ۱/۱۸ تا ۲/۱۴ متغیر بود، که پایین‌تر از آستانه بحرانی ۵ است، و نشان می‌دهد همخطی چندگانه، وجود دارد، ولی شدید نیست. آماره دوربین-واتسون با مقدار ۱،۷۹۸ نشان داد که فرض مستقل بودن خطاها رعایت شده است. به دلیل اینکه DO در عمل هم نقش قابل توجهی در تعیین مدل پیشنهادی Chla نداشت و از طرفی همخطی را افزایش می‌داد، در پایان تنها از شوری مطلق و دمای پایستار در مدل رگرسیون خطی استفاده شد.

## بحث و نتیجه گیری

در مطالعه حاضر ابتدا با استفاده از آنالیز واریانس پس از آزمون تغییرات مکانی دمای پایستار، شوری، اکسیژن محلول و کلروفیل-آ در سه منطقه بابلسر، نوشهر و رامسر مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از مدل رگرسیون سلسله مراتبی میزان نقش متغیرهای محیطی در غلظت کلروفیل-آ مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج آنالیز واریانس یک طرفه، نشان داد تفاوت آماری معنی داری در دمای پایستار در سه منطقه مورد مطالعه وجود ندارد ( $F(2,30) = 2.670$ ،  $p = 0.086$ ). که نشان می‌دهد دما در سه منطقه بابلسر، نوشهر و رامسر در طول دوره مطالعه تقریباً یکنواخت است و این پارامتر یک عامل تمایز کلیدی بین این مناطق نیست. در مقابل، نتایج بسیار معنی دار ANOVA برای شوری مشاهده شد ( $F(2,30) = 9.073$ ،  $p = 0.001$ ). از طرفی، نتایج آنالیز برای اکسیژن محلول ( $F(2,30) = 4.355$ ،  $p = 0.022$ ) و کلروفیل-آ ( $F(2,30) = 16.895$ ،  $p < 0.001$ ) تغییرات مکانی قوی را تأیید می‌کنند. تجزیه و تحلیل‌های پس از آزمون نشان می‌دهند که شوری در بابلسر به طور قابل توجهی بالاتر از مناطق دیگر است، در حالی که اکسیژن محلول و کلروفیل-آ در این منطقه پایین‌تر از مناطق دیگر می‌باشد. نوشهر و رامسر از نظر شوری بیشتر به یکدیگر شبیه هستند، اما در نوشهر کلروفیل-آ بالاتر از رامسر است. آزمون تعقیبی Tukey HSD غلظت‌های کلروفیل-آ در مکان‌های مختلف را نشان داد. کمترین مقدار در بابلسر، بعد از آن رامسر و بیشترین مقدار در نوشهر مشاهده شد. علاوه بر این، غلظت کلروفیل-آ در نوشهر به طور قابل توجهی بالاتر از رامسر بود ( $p = 0.012$ ). این الگوی مکانی متمایز نشان می‌دهد که عوامل محیطی محلی احتمالاً باعث تغییرپذیری زیست‌توده فیتوپلانکتون می‌شوند. بر اساس نتایج به دست آمده در مطالعه انجام شده توسط محمودی و همکاران (۱۳۹۲)<sup>[27]</sup> در سواحل مازندران، رودخانه‌ها به عنوان منبع اصلی ورود مواد مغذی (به ویژه ترکیبات فسفر) و مواد معلق به دریا شناسایی شده‌اند. به طور خاص، رودخانه بابلرود در بابلسر، رودخانه خیرود در نوشهر، و رودخانه صفارود در رامسر مهم‌ترین منابع تخلیه آب شیرین و مواد مغذی به دریای خزر محسوب می‌شوند. آنها همچنین گزارش کردند که ورود فاضلاب‌های خانگی، صنعتی و رواناب کودهای شیمیایی از طریق این رودخانه‌ها سبب افزایش میزان فسفات و تغییرات مکانی کیفیت آب در سواحل مازندران می‌شود. علاوه بر این، تغییرات هیدروپینامیکی در امتداد سواحل (کاهش انرژی امواج از شرق به غرب) می‌تواند بر الگوی اختلاط و توزیع مواد مغذی تأثیرگذار باشد (shahrban و Etemad Shahidi، 2010)<sup>[28]</sup>. بنابراین، الگوی مشاهده‌شده از تغییرات کلروفیل-آ در سه منطقه مورد مطالعه، احتمالاً ناشی از ترکیب این عوامل محلی است.

به منظور شناسایی محرک‌های فیزیکی کلروفیل-آ، مدل رگرسیون سلسله مراتبی اجرا شد. مدل نهایی شوری را به عنوان قوی‌ترین پیش‌بینی کننده غلظت کلروفیل-آ معرفی کرد ( $\beta = -0.651$ ،  $p < 0.001$ ). شوری بالا و کلروفیل-آ پایین در بابلسر، ممکن است نشان‌دهنده این باشد که شوری به عنوان یک عامل کلیدی محدودکننده برای رشد فیتوپلانکتون عمل می‌کند. این رابطه معکوس و معنادار با یافته‌های ارائه شده در تحقیقات پیشین<sup>[26]</sup> در سواحل ایرانی دریای خزر همسو است که گزارش کردند مناطق با شوری پایین‌تر از تراکم و غنای فیتوپلانکتونی بالاتری برخوردارند. از طرفی شوری کمتر و غلظت کلروفیل-آ بالاتر در نوشهر خود تأییدکننده این فرض است. برعکس، آب شورتر در بابلسر ممکن است محیط را کم‌غذا ۱۲ ساخته و رشد فیتوپلانکتون‌ها را محدود کند.

رابطه معکوس و معنی‌دار دما با کلروفیل-آ ( $\beta = -0.525$ ،  $p = 0.013$ ) می‌تواند نشان‌دهنده نقش کنترل‌کننده ثانویه لایه‌بندی دمایی باشد<sup>[9]</sup>. به این شکل که دمای سطح گرم‌تر، لایه‌بندی را تقویت می‌کند و یک مانع فیزیکی ایجاد می‌کند که از اختلاط عمودی و انتقال مواد مغذی از آب‌های عمیق‌تر و سردتر به منطقه نورگیر جلوگیری می‌کند. بنابراین، همبستگی منفی احتمالاً نشان‌دهنده شروع محدودیت مواد مغذی به دلیل لایه‌بندی است، نه یک اثر مهار مستقیم دما بر فیزیولوژی فیتوپلانکتون.

از طرفی عدم معنی‌داری اکسیژن محلول (DO) در مدل نشان می‌دهد که DO یک پیش‌بین مستقیم و مؤثر برای کلروفیل-آ در این مطالعه نبوده است. می‌توان استدلال کرد که الگوی مکانی غلظت کلروفیل-آ در سواحل جنوبی دریای خزر عمدتاً تابعی از تغییرپذیری فیزیکی محیطی است که میزان دسترسی به مواد مغذی را برای فیتوپلانکتون‌ها را تعیین می‌کند. نتایج این تحقیق، شوری و دما (به عنوان نماینده‌ای از لایه‌بندی) را به عنوان متغیرهای کلیدی برای پایش و پیش‌بینی تغییرات تولید اولیه در این اکوسیستم معرفی می‌نماید. همبستگی قوی میان پارامترهای فیزیکوشیمیایی و ترکیب فیتوپلانکتونی در تحقیقات پیشین<sup>[۲۶]</sup> نیز تأکید کرده‌اند، به نظر می‌رسد در دریای خزر، توزیع مکانی و زمانی فیتوپلانکتون‌ها تا حد زیادی یک پاسخ غیرمستقیم به تغییر در شرایط فیزیکی و در دسترس بودن مواد مغذی است.

### نتیجه‌گیری نهایی

الگوی مکانی غلظت کلروفیل-آ به‌عنوان شاخص زیست‌توده فیتوپلانکتون در مناطق ساحلی بابلسر، نوشهر و رامسر، عمدتاً توسط عوامل فیزیکی کنترل‌کننده دسترسی به مواد مغذی شکل می‌گیرد. بر اساس مدل رگرسیون سلسله مراتبی، شوری به‌عنوان قوی‌ترین عامل پیش‌بینی‌کننده منفی کلروفیل-آ شناخته شد که رابطه معکوس آن، به ویژه در منطقه شورتر بابلسر با کمترین غلظت کلروفیل-آ، بر نقش محدودکنندگی شوری تأکید دارد. دمای آب نیز که نماینده‌ای از میزان پایداری لایه‌بندی است، با ایجاد مانع برای اختلاط عمودی و انتقال مواد مغذی، همبستگی منفی ثانویه‌ای را نشان داد. در مقابل، اکسیژن محلول پیش‌بین معنی‌داری نبود. در مجموع، این یافته‌ها شوری و دما (به‌عنوان شاخص لایه‌بندی) را به‌عنوان متغیرهای کلیدی برای پایش و پیش‌بینی تغییرات تولید اولیه در اکوسیستم ساحلی جنوب دریای خزر معرفی می‌کنند.

### تشکر و قدردانی

در این بخش از همه کسانی که به نحوی در انجام کار همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود. نوشتن نام و نام خانوادگی افراد الزامی است. **تأییدیه اخلاقی:** در صورت کار با موجودات زنده، تأییدیه اخلاقی باید ذکر شود. در غیر اینصورت جمله، موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است، نوشته شود.

**تعارض منافع:** در صورت وجود هر گونه تعارض منافع، ذکر آن الزامی است. همچنین اگر مواد شیمیایی و یا امکانات خاصی از شرکت‌ها و موسساتی دریافت شده است، باید در این قسمت ذکر شود. در غیر این صورت جمله، هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان گزارش نشده است، نوشته شود.

**منابع مالی:** در صورت وجود ذکر شوند. توجه فرمایید که ذکر جمله از محل هزینه‌های شخصی امکان‌پذیر نیست.

**سهام نویسندگان:** سهم هر کدام از نویسندگان شامل ارائه طرح پژوهش، نمونه‌برداری، انجام کارهای آزمایشگاهی، فراهم آوردن داده‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها، استاد راهنمای دانشجو، نوشتن نسخه اولیه مقاله، تصحیح و ویرایش نسخه نهایی مقاله باید ذکر شود.

### منابع

[1] Keeling, R. F., Körtzinger, A., & Gruber, N. (2010). Ocean deoxygenation in a warming world. *Annual review of marine science*, 2(1), 199-229.

[2] Mongwe, P., Long, M., Ito, T., Deutsch, C., & Santana-Falcón, Y. (2024). Climatic controls on metabolic constraints in the ocean. *Biogeosciences*, 21(15), 3477-3490.

Tiano, L., Garcia-Robledo, E., Dalsgaard, T., Devol, A. H., Ward, B. B., Ulloa, O., Canfield, D. E. and Revsbech, N. P. (2014). Oxygen distribution and aerobic respiration in the north and south eastern tropical Pacific oxygen minimum zones. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 94, 173-183.

- [4] Weiss, R. F. (1970, August). The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. In Deep sea research and oceanographic abstracts (Vol. 17, No. 4, pp. 721-735). Elsevier.
- [5] Laffoley, D., & Baxter, J. M. (2019). Ocean deoxygenation: Everyone's problem-causes, impacts, consequences and solutions. Gland, Switzerland: IUCN. Chicago
- [6] Seale, A. P., Cao, K., Chang, R. J., Goodearly, T. R., Malintha, G. H. T., Merlo, R. S., ... & Reighard, J. R. (2024). Salinity tolerance of fishes: Experimental approaches and implications for aquaculture production. *Reviews in Aquaculture*, 16(3), 1351-1373.
- [7] Koehler, B., Erlandsson, M., Karlsson, M., & Bergström, L. (2021). Species richness and functional attributes of fish assemblages across a large-scale salinity gradient in shallow coastal areas. *Biogeosciences Discussions*, 2021, 1-31.
- [۸] نه‌اوندیان، سمیه . (۱۴۰۰). تغییرات فصلی کلروفیل-آ، اکسیژن محلول و کدورت در جنوب دریای خزر (سواحل نوشهر). علوم و فنون شیلات، ۳۴۱-۳۲۵، (۳)۱۰.
- [8] Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *science*, 321(5891), 926-929.
- [9] Behrenfeld, M. J., & Boss, E. S. (2014). Resurrecting the ecological underpinnings of ocean plankton blooms. *Annual Review of Marine Science*, 6, 167-194.
- [10] Boyer, J. N., Kelble, C. R., Ortner, P. B., & Rudnick, D. T. (2009). Phytoplankton bloom status: Chlorophyll a biomass as an indicator of water quality condition in the southern estuaries of Florida, USA. *Ecological indicators*, 9(6), S56-S67.
- [11] APHA, 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 15nd ed. American Public Health Association, Washington, D.C. Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological monographs*, 81(2), 169-193.
- [12] Desmit, X., Thieu, V., Billen, G., Campuzano, F., Dulière, V., Garnier, J., ... & Lacroix, G. (2018). Reducing marine eutrophication may require a paradigmatic change. *Science of the Total Environment*, 635, 1444-1466.
- [13] Stewart, R. H. (2008). *Introduction to physical oceanography*, Vol. 65, College Station: Texas A & M University.
- [14] McDougall, T. J., Barker, P., Feistel, R., & Roquet, F. (2023). A Thermodynamic Potential of Seawater in terms of Conservative Temperature. *EGUsphere*, 2023, 1-30.
- [15] Xue, T., Frenger, I., Prowe, A. F., José, Y. S., & Oschlies, A. (2022). Mixed layer depth dominates over upwelling in regulating the seasonality of ecosystem functioning in the Peruvian upwelling system. *Biogeosciences*, 19(2), 455-475.

- [16] IOC, SCOR, IAPSO, 2010. IAPSO, 2010: The International Thermodynamic Equation of Seawater—2010: Calculation and Use of Thermodynamic Properties. Manual and Guides No. 56. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO (English).
- [17] McDougall, T.J., Barker, P.M.. (2011). Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox, Vol. 127. SCOR/IAPSO WG, pp. 1–28.
- [18] Pawlowicz, R., Feistel, R., 2012. Limnological applications of the Thermodynamic Equation of Seawater 2010 (TEOS-10). *Limnol. Oceanogr. Methods* 10 (11), 853–867.
- [19] Nahavandian, S., Fereidouni, F. J., & Mahmoudi, N. (2022). On the seasonal variability of the vertical physical structure of the water column in the continental shelf, South-Eastern Caspian Sea. *Journal of Sea Research*, 187, 102246.
- [20] Millero, F. J., Mirzaliyev, A., Safarov, J., Huang, F., Chanson, M., Shahverdiyev, A., & Hassel, E. (2008). The equation of state for Caspian Sea waters. *Aquatic Geochemistry*, 14(4), 289-299.
- [21] Kara, A.B., Rochford, P.A., Hurlburt, H.E., 2000. An optimal definition for ocean mixed layer depth. *J. Geophys. Res. Oceans* 105 (C7), 16803–16821.
- [22] Monterey, G. I., & Levitus, S. (1997). Seasonal variability of mixed layer depth for the world ocean. NOAA Atlas NESDIS 14.
- [23] de Boyer Montégut, C., Madec, G., Fischer, A. S., Lazar, A., & Iudicone, D. (2004). Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C12).
- [24] Games, P. A., & Howell, J. F. (1976). Pairwise multiple comparison procedures with unequal n's and/or variances: a Monte Carlo study. *Journal of Educational Statistics*, 1(2), 113-125.
- [25] Agbangba, C. E., Aide, E. S., Honfo, H., & Kakai, R. G. (2024). On the use of post-hoc tests in environmental and biological sciences: A critical review. *Heliyon*, 10(3).
- [26] Nasrollahzadeh, H. S., Din, Z. B., Foong, S. Y., & Makhloogh, A. (2008). Trophic status of the Iranian Caspian Sea based on water quality parameters and phytoplankton diversity. *Continental Shelf Research*, 28(9), 1153-1165.
- [27] محمودی، ن.، احمدی، م.ر.، بابانژاد، م.، سیف‌آبادی، ج. و روحی، ا. (۱۳۹۲). ارزیابی ویژگی‌های مکانی کیفیت آب سواحل مازندران در فصل تابستان و شناسایی عوامل کنترل‌کننده آن (رویکرد چندمتغیره). فصلنامه علمی علوم و فنون شیلات، دوره ۲، شماره ۲، صفحات ۴۷–۶۱.
- [28] Shahrban, M., & Etemad-Shahidi, A. (2010). Classification of the Caspian Sea coastal waters based on trophic index and numerical analysis. *Environmental monitoring and assessment*, 164(1), 349-356.

# ~~Analysis of spatial changes in physicochemical indicators and their effect on primary production (chlorophyll-a) on the southern coast of the Caspian Sea using a hierarchical regression model~~

Mansoureh Arjmandi<sup>1</sup>, Somayeh Nahavandian<sup>2\*</sup>, Nemat Mahmoudi<sup>3</sup>

1- 1 Department of Marine Physics, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor

2\* Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor

3 Department of Aquaculture, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor

## ABSTRACT

The spatial variations of physicochemical parameters and their role in predicting chlorophyll-a on the southern coasts of the Caspian Sea was investigated in this study (Babolsar, Nowshahr and Ramsar). Measurements were carried out in the spring of 2012 with a CTD device and the data were processed according to the TEOS-10 standard. The mixed layer depth was calculated using the threshold method based on the density profile and with a threshold of  $0.5 \text{ kg.m}^{-3}$ , which showed significant spatial variations from 5 m to 16 m in different areas. The results showed that salinity, dissolved oxygen and chlorophyll-a have significant spatial variations. The highest salinity was observed in Babolsar ( $13.95 \text{ g.kg}^{-1}$ ) with the lowest chlorophyll-a and the lowest salinity was observed in Nowshahr ( $13.34 \text{ g.kg}^{-1}$ ) with the highest chlorophyll-a. Hierarchical regression model to determine the role of different parameters in determining chlorophyll-a showed that salinity and temperature are negative and significant predictors and explain 46.3% of its variance. The overall conclusion indicates that primary production is strongly controlled by physical factors affecting nutrient availability.

**KEYWORDS:** Chlorophyll-a, Mixed Layer Depth, Temperature, Salinity, South of Caspian Sea

## ARTICLE TYPE

Original Research

## ARTICLE HISTORY

Received:

2025/12/21

Revised:2026/01/10

Accepted:

2026/02/19

ePublished:

2026/03/06