

## تغییرات فصلی ستون قائم آب و تخمین عمق لایه آمیخته بر پایه دما با استفاده از روش آستانه در منطقه بابلسر و رامسر

فاطمه جان‌نار فریدونی<sup>۱</sup>، سمیه نهاوندیان اصفهانی<sup>۲\*</sup> و نعمت‌الله محمودی<sup>۳</sup>

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

۲. استادیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۳. استادیار، گروه علوم و مهندسی شیلات، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

(دریافت: ۹۸/۶/۱۲، پذیرش نهایی: ۹۸/۱۱/۱)

### چکیده

در این تحقیق تغییرات فصلی و مکانی عمق لایه آمیخته و ساختار قائم دما و شوری در آب‌های نزدیک به ساحل دریای خزر در منطقه بابلسر و رامسر در سه فصل بهار، تابستان و پاییز سال ۱۳۹۱ با استفاده از اندازه‌گیری‌های CTD مورد بررسی قرار گرفت. با وجود مشابهت محدوده تغییرات دما و شوری در دو منطقه اندازه‌گیری، نوسانات شوری در بابلسر بالاتر از رامسر و در فصل بهار شوری در لایه سطحی در رامسر به شکل قابل توجهی کمتر از بابلسر است. هالوکلاین تقریباً هم‌عمق ترموکلاین قرار داشته و به شکل نوسانات شدید شوری خود را نشان می‌دهد. برای تخمین عمق لایه آمیخته از روش آستانه و با آستانه‌های  $(^{\circ}\text{C}) 0.05$ ،  $(^{\circ}\text{C}) 0.1$ ،  $(^{\circ}\text{C}) 1$  و  $(^{\circ}\text{C}) 1.25$  استفاده شد. بدون در نظر گرفتن تفکیک فصلی مقدار آستانه  $(^{\circ}\text{C}) 1.25$  عمق لایه آمیخته را بهتر از مقادیر دیگر آستانه تخمین زد. در نهایت الگوریتم ترکیبی به تفکیک فصل، با آستانه  $(^{\circ}\text{C}) 1.25$  در بهار،  $(^{\circ}\text{C}) 1$  در تابستان و مقدار آستانه  $(^{\circ}\text{C}) 0.1$  در فصل پاییز برای تخمین عمق لایه آمیخته مورد استفاده قرار گرفت. کمینه و بیشینه عمق لایه آمیخته به ترتیب در بهار و پاییز مشاهده شد و طبق نتایج به دست آمده، ساختار قائم لایه آمیخته را می‌توان به سه نوع، کلاسیک در پاییز، شیب‌دار در بهار و پله‌ای در تابستان تقسیم کرد.

واژه‌های کلیدی: دریای خزر، بابلسر، رامسر، لایه آمیخته، عمق لایه آمیخته.

### ۱. مقدمه

ذوب، بارش و ایجاد یخ منجر به تغییرات خصوصیات و عمق این لایه می‌شوند. به علت تماس مستقیم لایه آمیخته با جو خصوصیات این لایه تحت تأثیر مستقیم تغییرات روزانه، فصلی و سالانه جوی است و از طرفی شار گرمایی جو از طریق این لایه به قسمت عمیق اقیانوس منتقل می‌شود (یه و همکاران، ۲۰۰۹). عمق لایه آمیخته (MLD, Mixed layer Depth) بسته به تغییرات کوتاه‌مدت و درازمدت جوی و مکانی به شکل روزانه، فصلی و سالانه تغییر می‌کند (استوارت، ۲۰۰۸؛ تامسون و فاین، ۲۰۰۳). لایه زیرین لایه آمیخته، لایه‌ای است که در آن خصوصیات فیزیکی نسبت به عمق به شدت دچار تغییر می‌شود که در نیم‌رخ (Profile) دما، شوری و چگالی به ترتیب ترموکلاین، هالوکلاین (Halocline) و پیکنوکلاین (Pycnocline) نامیده می‌شود. لایه عمیق که

دریاها و اقیانوس‌ها نقش به‌سزایی در شرایط آب‌وهوایی و همچنین تغییرات اقلیم کره زمین ایفا می‌سازند. علاوه بر این پدیده‌های فیزیکی یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر شیمی، زیست و محیط‌زیست دریا هستند (دورنزیو و همکاران، ۲۰۱۴). از همین رو شناخت فرآیندهای فیزیکی حاکم بر دریاها و اقیانوس‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (سیمپسون و همکاران، ۲۰۱۲؛ استوارت، ۲۰۰۸؛ فاکوسکی و همکاران، ۱۹۹۸). ستون قائم آب که مستقیماً تحت تأثیر عواملی نظیر شوری، فشار، چگالی و دماست، را می‌توان متشکل از سه لایه آمیخته، ترموکلاین و عمیق دانست. لایه آمیخته که در سطح دریاها یا اقیانوس‌ها قرار دارد، به دلیل وجود تلاطم و آشفتگی ناشی از برهم‌کنش هوا-دریا دارای ویژگی‌های فیزیکی تقریباً یکنواخت است. عوامل مختلفی مانند تنش باد، شار گرمایی، تبخیر،

در زیر لایه شیب (ترموکلاین، هالوکلاین و پیکنوکلاین) قرار دارد، دارای خصوصیات فیزیکی نسبتاً ثابت است. به علت ظرفیت گرمایی بالای آب، تغییرات خصوصیات لایه آمیخته، به خصوص عمق آن نقش به سزایی در تغییرات اقلیم ایفا می کند (کانسا و کلایسون، ۲۰۰۳). لایه آمیخته اقیانوسی با مبادله جرم، تکانه، انرژی و گرما بین جو و اقیانوس ها نقش مهمی در آب و هوای درازمدت ایفا می کند. با توجه به این که اقیانوس ها بیش از ۷۰ درصد سطح زمین را تشکیل می دهند و بیشترین جذب انرژی گرمایی خورشید در اقیانوس ها نیز توسط لایه آمیخته انجام می شود، نقش عمق لایه آمیخته و همچنین تأثیرپذیری خصوصیات این لایه در تغییر اقلیم غیرقابل انکار است. لایه آمیخته به علت افزایش انرژی خورشید در طول بهار و تابستان، گرم و در پایین و زمستان به آرامی این گرما را از دست می دهد. همچنین تحولات کوتاه مدت و درازمدت جوی نه تنها بر تغییرات خصوصیات این لایه تأثیرگذار هستند، بلکه از تغییرات این لایه نیز تأثیرپذیر می باشند. لایه آمیخته همچنین به علت ارتباط مستقیم با جو، نقش قابل توجهی در فرایندهای بیوشیمیایی و تبادلات گاز با جو بازی می کند (یه و همکاران، ۲۰۰۹). اختلاط موجود در لایه آمیخته با ایجاد همرفت (Convection) در ستون آب منجر به افزایش بهره وری آب های سطحی از طریق انتقال مواد مغذی از آب های عمیق تر می شود (دوکیوز و همکاران، ۲۰۰۱؛ لایون و همکاران، ۲۰۱۳). از طرفی تغییرات بلندمدت عمق این لایه، بر منابع نور و مواد مغذی موجود در لایه های عمیق تأثیرگذار است. چراکه با ایجاد همرفت در ستون آب، مواد موجود در لایه های عمیق را به لایه های نزدیک به سطح منتقل و با کنترل همزمان نور و مواد مغذی بر میزان غلظت کلروفیل-a تأثیر می گذارد (زو و همکاران، ۲۰۱۳).

تابه حال مطالعات گسترده ای روی تغییرات MLD در اقیانوس های جهان انجام شده است و بسته به منطقه مورد مطالعه روش های بسیاری برای تخمین MLD ارائه شده

است. به عنوان مثال می توان به روش آستانه، گرادیان، رگرسیون حداقل مربعات و انتگرال اشاره کرد که هر کدام از این روش ها برحسب مشخصه های فیزیکی منطقه مورد مطالعه می توانند مورد استفاده قرار گیرند (اشنایدر و مولر، ۱۹۹۰؛ پایاداکیس، ۱۹۸۱؛ لوکاس و لیندستروم، ۱۹۹۱). طبق مطالعه ای که توسط پیکارت و همکاران (۲۰۰۲) در دریای لابرادور انجام شد، MLD با استفاده از پارامترهای فیزیکی نظیر دما و شوری و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که در برخی مناطق در دریای لابرادور، به دلیل همرفت عمیق، MLD به ۱۵۰۰ متر می رسد. نتایج مدل سازی تغییرات سالانه و فصلی MLD در اقیانوس هند نشان داد که تغییرات سالانه MLD، ۲ الی ۴ بار کوچک تر از تغییرات فصلی آن می باشد (کیرسی و همکاران، ۲۰۱۳). مطالعه ای بر روی تغییرات خصوصیات فیزیکی لایه آمیخته در منطقه جنوب دریای بوفورت (Beaufort Sea) و خلیج اماندسن (Amundsen Gulf) به عنوان بخشی از اقیانوس منجمد شمالی کانادا (Canadian Arctic)، توسط نهانوندیان (۲۰۱۴) انجام شد و نتایج نشان دهنده کمترین عمق MLD در تابستان و بیشترین عمق در بهار بود.

طبق نتایج به دست آمده از اندازه گیری ها در منطقه رودسر در تابستان ۱۳۸۷، عمق لایه آمیخته تا عمق ۱۰ متر با دمای (°C) ۲۸-۲۹ و ترموکلاین در اعماق ۴۰-۱۰ متر با تغییر دمای حدود (°C) ۱۸ در پایه لایه آمیخته و شوری در محدود اندازه گیری در حدود ۱۳-۱۲/۱۸ (psu) مشاهده شد (جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۰). در مطالعه دیگری که بر اساس اندازه گیری های فصلی در سال ۱۳۸۸ انجام شد (علیزاده کتک لاهیجانی و همکاران، ۱۳۹۳)، تغییرات فصلی دما و شوری مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده در این مطالعه شوری با تغییرات بین ۱۲/۳۷-۱۲/۲۷ به طور محسوسی تحت تغییرات فصلی قرار نداشت. مطالعه مشابهی بر اساس اندازه گیری های فصلی در منطقه انزلی در سال ۲۰۰۸ انجام شد (علیزاده کتک لاهیجانی و همکاران، ۱۳۹۳). نتایج به دست آمده نشان داد

و ۳۳ دقیقه و از غرب به شرق در بین نصف‌النهارهای ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه و ۵۴ درجه و ۵۳ دقیقه قرار دارد. این دریا با مساحت ۴۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع و طول خط ساحلی حدود ۷۵۰۰ کیلومتر با میانگین و حداکثر عمق به ترتیب ۲۰۸ متر و ۱۰۲۵ متر بزرگ‌ترین آب محصور در خشکی جهان است (کستیانوی و کسارو، ۲۰۰۵). طبیعت بسته خزر، آن را منزلگاه جانوران و گیاهان منحصربه‌فردی کرده است. در عین حال، همین امر موجب آسیب‌پذیری بیشتر آن نسبت به آلودگی‌های کشاورزی و صنعتی و نفتی شده است. همان‌طور که پیش از این اشاره شد و به علت نقش تأثیرگذار لایه آمیخته در خصوصیات زیستی و شیمیایی، تخمین عمق این لایه حائز اهمیت است.

اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی در ستون آب و در فصول بهار، تابستان و پاییز سال ۱۳۹۱ در راستای خط عمود بر ساحل (ترانسکت) در ۴-۵ ایستگاه و در بابلسر و رامسر انجام شده است که در لایه‌های متفاوت (تغییرات ناشی از عمق) در عمق‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۵، ۵۰، ۸۰ و ۱۰۰ متر در سال ۱۳۹۱ در سه فصل بهار، تابستان و پاییز انجام شد (شکل ۱).

اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در این تحقیق با استفاده از دستگاه CTD، مدل ۳۱۶ Idronaut Ocean Seven انجام شد. CTD مخفف سه کلمه هدایت الکتریکی (Conductivity)، دما (Temperature) و عمق (Depth) است و CTD مورد استفاده در این تحقیق، مجهز به سنسورهای کدورت (FTU)، اکسیژن محلول در آب (mg/l)، شوری (PSU)، PH و کلروفیل-a ( $\mu\text{g/l}$ ) بوده است. در هر مرحله از اندازه‌گیری، ابتدا سنسورهای دستگاه کالیبره و سپس دستگاه به داخل آب رها و اندازه‌گیری‌ها با فاصله زمانی مشخص، ثبت و ذخیره شده‌اند به منظور کالیبراسیون حسگر (Sensor) فشار، دستگاه CTD را قبل از اندازه‌گیری به کامپیوتر متصل کرده و فشار هوا را حذف می‌کنیم. برای کالیبراسیون دیگر حسگرها، در هر بار اندازه‌گیری دستگاه در نزدیکی سطح در عمق کمتر از یک متر به مدت حدود ۱۰ ثانیه

که عمق لایه آمیخته در تمامی ایستگاه‌ها ثابت و به ترتیب در بهار، تابستان و پاییز ۸، ۲۰ و ۳۵ متر و گستره تغییرات شوری بین ۱۲/۳۷-۱۲/۲۷ بوده است. لازم به ذکر است در مطالعات اشاره‌شده تخمین عمق لایه آمیخته به شکل چشمی و بدون استفاده از روش‌های ریاضی انجام شده است. در روش چشمی عمق لایه آمیخته عمقی است که خصوصیات فیزیکی (در اینجا دما) از سطح تا عمق مورد نظر تقریباً ثابت است. درست پیش از ورود به ترموکلاین، لایه‌ای که خصوصیات فیزیکی (در اینجا دما) در آن نسبت به عمق به شدت کاهش می‌یابد.

علی‌رغم نقش به‌سزا و اهمیت لایه آمیخته، هنوز مطالعه جامعی در مورد تغییرات MLD در دریای خزر انجام نشده است. از طرفی تا به حال هیچ روش ریاضی مشخصی برای تعیین MLD در این اکوسیستم استفاده نشده است. علاوه بر این روش چشمی نیازمند به دقت زیاد وابسته به فاعل است که مقدار تخمین‌زده شده توسط شخصی به شخص دیگری را دچار تغییر کند. در این مطالعه ابتدا تغییرات دما و شوری در ایستگاه‌های مختلف در دو منطقه بابلسر و رامسر مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از روش چشمی و آستانه عمق لایه آمیخته تخمین زده شد. پس از آن به منظور سنجش میزان نزدیکی اعماق لایه آمیخته تخمین‌زده شده با استفاده از روش آستانه به روش چشمی، از شاخص‌های آماری استفاده و مقدار آستانه مطلوب معرفی شد. در پایان تغییرات فصلی MLD در دو منطقه مورد نظر بررسی شد.

## ۲. منطقه مورد مطالعه و داده‌های اندازه‌گیری

منطقه مورد مطالعه در سواحل خزر جنوبی و میانی استان مازندران واقع شده است. دریای خزر به عنوان بزرگ‌ترین توده آبی محصور در خشکی میان کشورهای ایران، ترکمنستان، قزاقستان، روسیه و آذربایجان در غرب آسیا، شرق قفقاز و شمال رشته کوه البرز واقع شده است. بدون در نظر گرفتن خلیج قره‌بغار این دریا از شمال و جنوب به ترتیب در بین مدارهای ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه و ۳۶ درجه

به دست آمده از اندازه‌گیری‌های CTD در دریای خزر، برای در دست داشتن شوری واقعی نیازمند تصحیحاتی است. طبق اندازه‌گیری‌ها و مطالعات انجام شده توسط پیترز و همکاران (۲۰۰۰)، ضریب تصحیح  $\delta_{Caspian} = 1/0.907$  برای دریای خزر پیشنهاد شده است. در این مطالعه، ابتدا منطقه مورد مطالعه مورد پایش و داده‌های اندازه‌گیری شده تحت پردازش قرار گرفته شد.

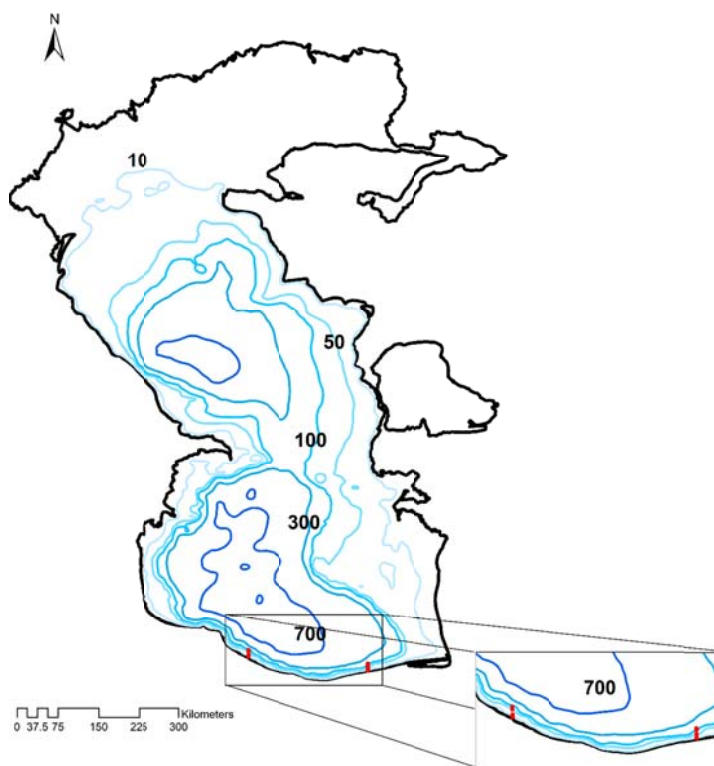
### ۳. روش پژوهش

#### ۳-۱. پردازش داده‌ها و تخمین عمق لایه آمیخته

ابتدا داده‌های خام حاصل از اندازه‌گیری‌های CTD در فواصل یک متری درون‌یابی خطی شدند. لازم به ذکر است از آنجایی که اندازه‌گیری‌های CTD در فواصل بسیار نزدیک به هم انجام شده‌اند، نتیجه درون‌یابی به دست آمده با استفاده از روش‌های مختلف از جمله درون‌یابی خطی، مکعبی (Cubic) و اسپلاین (Spline) نتیجه یکسان دارند و از همین رو تمامی درون‌یابی‌ها با استفاده از روش خطی انجام شد.

نگه داشته و سپس به آرامی در ستون آب رها می‌شود. پس از اتمام اندازه‌گیری‌ها نیز دستگاه و حسگرهای آن با آب شیرین شستشو داده می‌شود. پس از اتمام هر اندازه‌گیری، داده‌های خام ثبت شده در دستگاه CTD با استفاده از نرم‌افزار Hyperterminal به رایانه انتقال داده شد. در اندازه‌گیری‌ها همچنین از GPS برای تعیین موقعیت جغرافیایی موردنظر و اکوساندر دستی (Echosounder) برای سنجش عمق آب استفاده شده است. علت استفاده از اکوساندر پیش از انجام اندازه‌گیری، تخمین عمق و تنظیم عمق انتقال دستگاه به داخل آب، به منظور پیشگیری از برخورد دستگاه با بستر بوده است.

شوری عبارت است از مقدار کل مواد محلول بر حسب گرم در یک کیلوگرم آب دریا که به علت رابطه مستقیم شوری با رسانایی، از سال ۱۹۷۸ تعریف رسمی شوری با استفاده از رسانایی آب دریا در دمای اندازه‌گیری شده، برحسب PSU به دست می‌آید. از آنجاکه ترکیب یونی آب دریای خزر با آب‌های آزاد متفاوت است، شوری



شکل ۱. مناطق اندازه‌گیری در جنوب دریای خزر در دو منطقه بابلسر و رامسر. خط‌های قرمز موجود در این شکل ایستگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشند.

مقدار آستانه از پیش تعیین شده فراتر رود. در این مطالعه، MLD با چهار آستانه مختلف محاسبه شد. سپس MLDهایی که با استفاده از آستانه‌های مختلف تخمین زده شد، به دو روش بصری و آماری با مقادیر چشمی مقایسه شد. سپس الگوریتم پیشنهادی برای تخمین ریاضی MLDها معرفی شد و در نهایت تغییرات فصلی MLD در دو منطقه مورد مطالعه بررسی شد.

### ۳-۲. ارزیابی مقادیر آستانه

در این مطالعه به منظور برآورد میزان نزدیکی MLD تخمین زده شده با استفاده از روش‌های چشمی و آستانه، از دو روش بصری و آماری استفاده شد. در برآورد بصری برای مقایسه میان MLDهای چشمی و MLDهای تخمین زده شده با استفاده از روش آستانه برحسب یکدیگر رسم شد. میزان نزدیکی نقاط به خط  $45^\circ$  نشان‌دهنده نزدیکی این دو برآورد با هم و مناسب بودن مقدار آستانه است.

در برآورد آماری به منظور میزان نزدیکی MLDهای چشمی (MLDV, Mixed layer depth visual) و MLDهای تخمین زده شده با استفاده از روش آستانه (MLDC, Mixed layer depth calculated) چند شاخص آماری مورد استفاده قرار گرفت. شاخص‌های آماری استفاده شده در این تحقیق، عبارت‌اند از میانگین خطای مطلق (MAE بر حسب متر) که یکای آن m می‌باشد، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE بر حسب متر)، خطای نسبی کل (RAE بی بعد) و ضریب همبستگی پیرسون  $R^2$  (داوسون و همکاران، ۲۰۰۶) که یک پارامتر بی بعد است. شاخص MAE (رابطه ۱)، مقدار متوسط خطاهای مطلق را میان تخمین‌ها و ارزیابی چشمی ارائه می‌دهد، که کمترین مقدار مربوط به این شاخص، نشان دهنده بهترین تخمین می‌باشد. شاخص RMSE (رابطه ۲)، مجذور میانگین مربعات خطاست که میزان انحراف مقادیر تخمین زده شده (MLDC) را از مقادیر چشمی (MLDV) نشان می‌دهد. این شاخص همواره مثبت است و هرچه قدر

در این مطالعه MLD با استفاده از ۲ روش آستانه و روش چشمی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس این روش، MLD عمقی است که در آن اختلاف پارامتر مورد نظر، نظیر دما با مقدار آن در عمق مرجع که معمولاً عمقی در نزدیکی سطح در نظر گرفته می‌شود، از یک مقدار از پیش تعیین شده (آستانه (Threshold)) تجاوز کند (تامسون و فاین، ۲۰۰۳؛ ویرتکی، ۱۹۶۴؛ تول و همکاران، ۲۰۱۰؛ جاوب و همکاران، ۲۰۱۹). مقدار آستانه بسته به منطقه مورد مطالعه مختلف بوده و نمی‌توان مقداری واحد برای تمامی مناطق معرفی کرد. به طوری که تا به حال محققان بسیاری در مناطق مختلف از آستانه‌های متفاوتی استفاده کرده‌اند. به طور مثال مقدار آستانه تعیین شده توسط تامسون (۱۹۷۶)،  $0.2^\circ\text{C}$  می‌باشد و به همین ترتیب پرایس و همکاران (۱۹۸۶)، کلی و کیو (۱۹۹۵)، اوباتا و همکاران (۱۹۹۶)، مونتری و لویوس (۱۹۹۷) مقدار  $1^\circ\text{C}$ ، کارا و همکاران (۲۰۰۰)، کوو و همکاران (۲۰۰۷) مقدار  $0.8^\circ\text{C}$  و لمب (۱۹۸۴)، واگنر (۱۹۹۶) آستانه  $1^\circ\text{C}$  را استفاده کرده‌اند. روش دیگری که به عنوان معیار سنجش و مقایسه با عمق تخمین زده شده در نظر گرفته شده است، روش برآورد چشمی می‌باشد. به علت وجود نوسانات دمایی زیاد در بعضی از نیم‌رخ‌های دما، گاهی اوقات روش‌های ریاضی ممکن است مقادیر بسیار متفاوت از واقعیت ارائه می‌دهند. به طوری که مقادیر بسیار کوچک‌تر و یا بسیار بزرگ‌تر از MLD واقعی است. در این تحقیق روش چشمی به منظور اجتناب از این گونه تخمین‌ها در جهت به دست آوردن مقدار آستانه مطلوب مورد استفاده قرار گرفته است. در برآورد چشمی، ابتدا ایستگاه‌هایی که در نیم‌رخ دمای آنها دارای حداقل دو لایه آمیخته و ترموکلاین بوده است، MLD به صورت چشمی تعیین شد. بدین صورت که MLD دقیقاً جایی که در زیر آن ترموکلاین فصلی، یعنی جایی که شکست شدید دمایی رخ دهد، در نظر گرفته شد. در روش آستانه، MLD عمقی در نظر گرفته می‌شود که در آن مقدار دما از دمای عمق مرجع (در این مطالعه عمق ۱ متر) از یک

با استفاده از روش آستانه و با ۴ آستانه مختلف تخمین زده می‌شود. سپس با استفاده از دو برآورد بصری و آماری، آستانه مناسب صرفنظر از تفکیک فصل و با در نظر گرفتن تفکیک فصلی مورد ارزیابی قرار گرفته و برای تخمین عمق لایه آمیخته انتخاب خواهد شد.

#### ۴-۱. تغییرات فصلی و مکانی دما و شوری

شکل ۲ نمایشگر برش قائم دما و شوری بر حسب عمق در سه فصل بهار، تابستان و پاییز در ایستگاه‌های مختلف با اعماق مختلف در دو منطقه بابلسر و رامسر در کنار نیم‌رخ دما است. نیم‌رخ‌های دما با فواصل (°C) ۱۲ از یکدیگر، به‌منظور کمک به درک تفاوت‌ها و تغییرات فصلی و مکانی در هر ایستگاه رسم شده‌اند.

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، MLD در هر دو منطقه در پاییز بیشینه و در بهار کمینه است. علت بیشترین مقدار MLD در فصل پاییز افزایش سرعت باد (افشاریان و تیلور، ۲۰۱۹) و همچنین کاهش دما است. علت کمینه بودن MLD در بهار به‌علت افزایش دما و بارش است که به‌دنبال آن افزایش چینه‌بندی (Stratification) و کاهش MLD اتفاق می‌افتد. MLD در هر سه فصل در منطقه رامسر بیشتر از بابلسر است و همان‌طور که در شکل نیز مشهود است محدوده رنگ‌های زرد مایل به نارنجی ترموکلاين می‌باشد. در فصل تابستان شکست دما در پایه لایه آمیخته در بابلسر به‌شکل قابل توجهی شدیدتر از رامسر است. بدین‌معناکه در رامسر ترموکلاين با انحنای ملایم و در بابلسر با گرادیان بسیار بیشتر آغاز می‌شود. در هر دو منطقه در فصل بهار لایه آمیخته در نزدیکی سطح شیب‌دار می‌باشد. دمای لایه آمیخته در پاییز کمینه و در بابلسر و رامسر به‌ترتیب بین (°C) ۸-۲۸ و (°C) ۷/۷-۱۷/۵۶، در بهار بین (°C) ۸-۲۹/۶ و (°C) ۸-۲۶/۶۲ و در تابستان بیشینه بین (°C) ۸/۵-۳۰/۹ متغیر است. تغییرات دما در لایه‌های مختلف در این تحقیق با مطالعات جمشیدی و همکاران (۲۰۱۰) در منطقه رودسر در تابستان ۱۳۸۷، قابل‌مقایسه است.

مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده میزان کمتر خطاست. شاخص RAE (رابطه ۳) که عبارت است از نسبت خطای نسبی کل میان اعماق تخمین‌زده‌شده (MLDC) و چشمی (MLDV) به اختلاف اعماق برآوردشده چشمی با میانگین آنها، به‌منظور محاسبه خطای مطلق نسبی استفاده می‌شود. این شاخص یک متریک مثبت است و در یک تخمین ایده‌آل و منطبق بر تخمین چشمی مقدار آن صفر خواهد بود. هر چه مقدار آن کمتر باشد، بدین‌معناست که اعماق به‌خوبی تخمین‌زده‌شده است و به مقادیر چشمی نزدیکی بیشتری دارد (داوسون و همکاران، ۲۰۰۶). ضریب همبستگی پیرسون یا شاخص Rsqr که در رابطه ۴ نشان داده شده است، شاخصی است که میزان همبستگی میان مقادیر تخمین‌زده‌شده با روش آستانه و مقادیر چشمی به‌دست می‌دهد. ضریب همبستگی میان ۰ و ۱ متغیر است که مقدار ۱ نشان‌دهنده همبستگی خطی و حداکثری و نشان‌دهنده نبود همبستگی میان اعماق تخمین‌زده‌شده (MLDC) و چشمی (MLDV) است (منلای و آلبرتو، ۲۰۱۶). مقادیر به‌دست‌آمده از این شاخص‌ها میزان نزدیکی MLDC و MLDV را نشان داده و مقدار آستانه مطلوب را به‌دست می‌دهد.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |MLDV - MLDC| \quad (1)$$

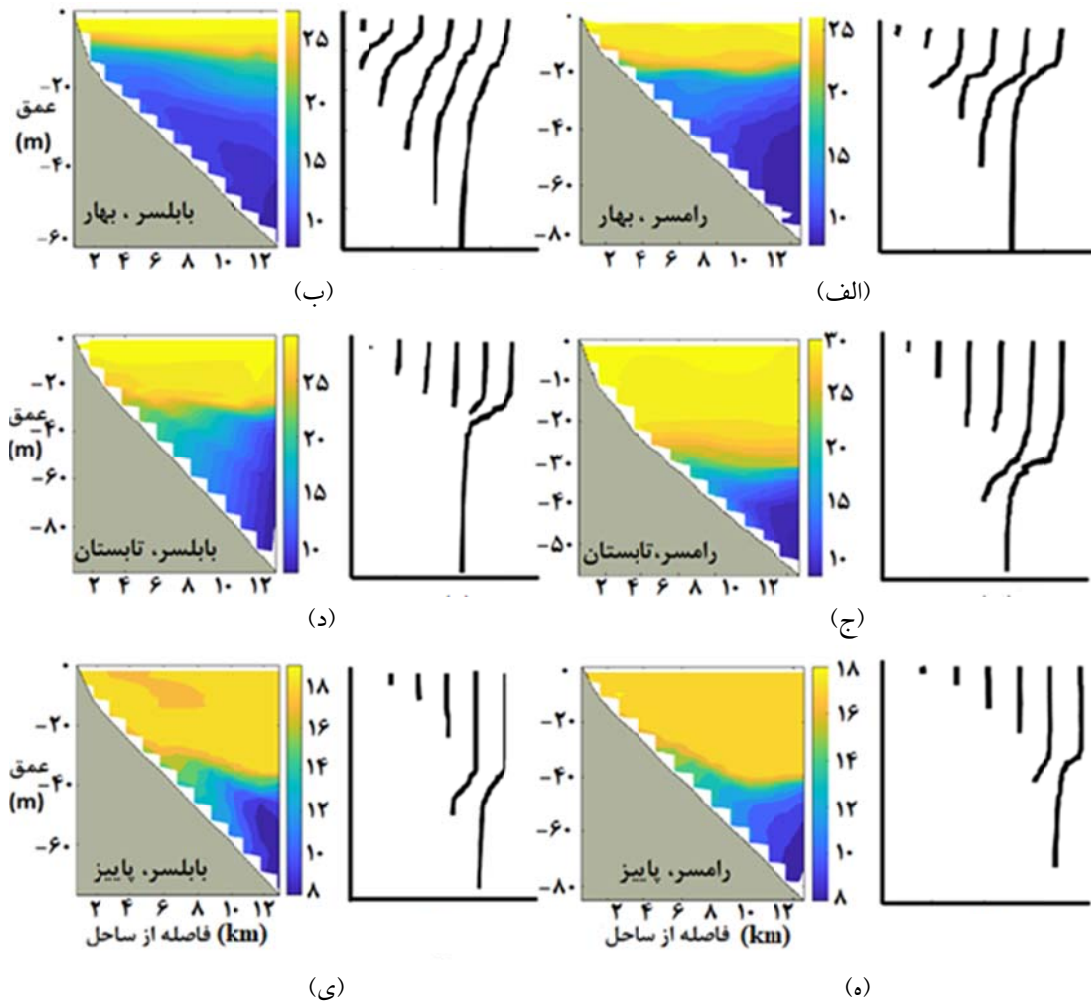
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MLDV - MLDC)^2}{n}} \quad (2)$$

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^n |MLDV - MLDC|}{\sum_{i=1}^n |MLDV - \overline{MLDV}|} \quad (3)$$

$$Rsqr = \frac{\left[ \frac{\sum_{i=1}^n (MLDV - \overline{MLDV})(MLDC - \overline{MLDC})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (MLDV - \overline{MLDV})^2 \sum_{i=1}^n (MLDC - \overline{MLDC})^2}} \right]^2 \quad (4)$$

#### ۴. بحث

در این بخش از تحقیق ابتدا به بررسی تغییرات فصلی و مکانی دما و شوری در ستون آب پرداخته شده است و پس از آن عمق لایه آمیخته در دو منطقه بابلسر و رامسر



شکل ۲. برش عمودی دما بر حسب فاصله از ساحل در فصل‌های بهار در منطقه رامسر (الف) و بابلسر (ب)، تابستان در منطقه رامسر (ج) و بابلسر (د) و پاییز در منطقه رامسر (ه) و بابلسر (و) به همراه نیمرخ دما در هر منطقه به تفکیک فصل. نیمرخ‌های دما در هر ایستگاه با گام (°C) ۱۱۲ از ایستگاه قبلی.

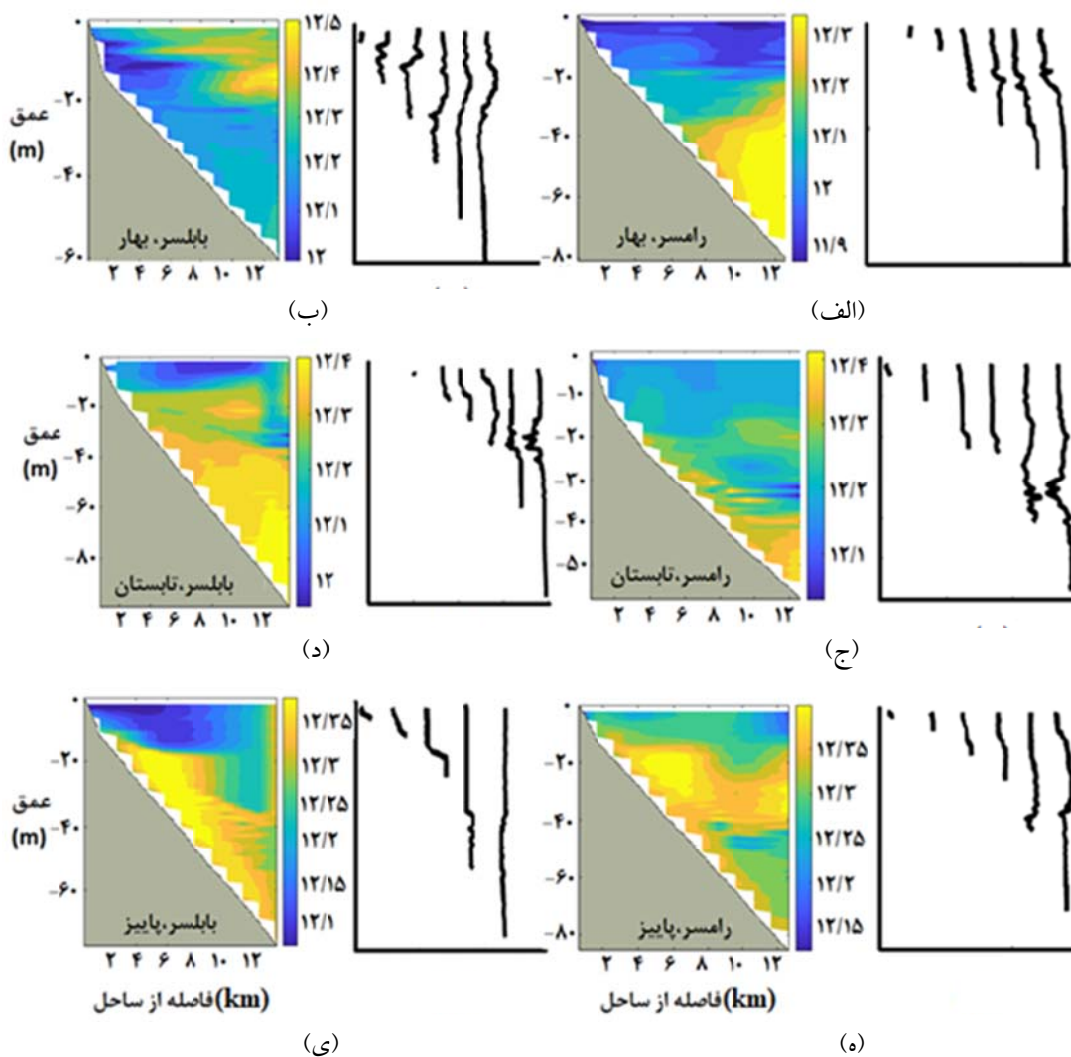
خصوصیات فیزیکی می‌شود. علاوه بر این در فصل بهار در رامسر بدلیل بارش بیشتر (پیرنیا و همکاران، ۱۳۹۴)، شوری نسبت به بابلسر کمتر است و در فصل تابستان و بهار نوسانات شوری در لایه آمیخته نسبت به رامسر بیشتر است.

در اقیانوس‌ها و آب‌های آزاد که گستره تغییرات شوری بیشتر است، هالوکلاین جایی تعریف می‌شود که شوری با افزایش عمق، افزایش یابد. با این حال در دریای خزر در ایستگاه‌های کمی شاهد هالوکلاین به این شکل هستیم و می‌توان گفت هالوکلاین جایی است که نوسانات شوری در آن زیاد است که عمق آن تقریباً با عمق ترموکلاین

شکل ۳ برش قائم شوری بر حسب فاصله از ساحل را در کنار نیمرخ‌های شوری در سه فصل بهار، تابستان و پاییز نشان می‌دهد که با گام‌های ۰/۵ از یکدیگر تفکیک شده‌اند. چنانچه در شکل نشان داده شده است شوری در سطح در رامسر در فصل بهار و تابستان کمتر از شوری در همین فصول در منطقه بابلسر است، در حالی که در فصل پاییز شوری در سطح در بابلسر کمتر از شوری رامسر است. در هر دو منطقه نوسانات شوری در فصل‌های بهار و تابستان بیشتر از پاییز است. دلیل نوسانات کمتر شوری در پاییز را می‌توان به آمیختگی زیاد ستون آب در این فصل نسبت داد که منجر به یکنواختی

تغییرات بین (psu)  $12/27 - 12/37$  (علیزاده کتک لاهیجانی و همکاران، ۱۳۹۳) به طور قابل توجهی کمتر از محدوده تغییرات شوری در مناطق مورد بررسی در مطالعه حاضر است (psu)  $11/9 - 12/6$ . از طرفی به جز در بهار بابلسر و پاییز رامسر (شکل ۳-ب و ه) در بقیه موارد می توان گفت که شوری در سطح کمینه و با افزایش عمق افزایش یافته است و در بهار بابلسر و پاییز رامسر شاهد بیشینه شوری در هالوکلاین هستیم. در تابستان در منطقه بابلسر هالوکلاین در عمق بین ۱۵-۲۵ متر مشاهده می شود (شکل ۳-د).

یکسان است. محدوده شوری در هر دو منطقه در فصل های پاییز و تابستان مشابه است در حالی که در بهار شوری در رامسر کمتر از بابلسر است. در مقایسه با نتایج به دست آمده از مطالعات انجام شده در منطقه رودسر در تابستان ۱۳۸۷، که شوری در محدود اندازه گیری در حدود (psu)  $12 - 13/18$  گزارش شد (جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۰)، شوری در فصل تابستان در مناطق مورد مطالعه به شکل قابل توجهی کمتر است (۱۲-۱۲/۴)، شکل ۳-ج و ۳-د. در مطالعه ای دیگر که در منطقه انزلی در فصل های بهار، تابستان و پاییز انجام شد محدوده شوری با

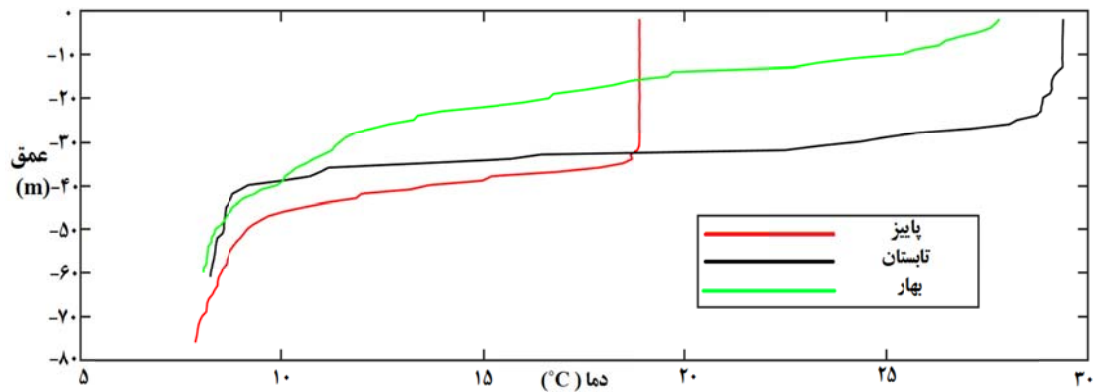


شکل ۳. برش عمودی شوری بر حسب فاصله از ساحل در فصل های بهار در منطقه رامسر (الف) و بابلسر (ب)، تابستان در منطقه رامسر (ج) و بابلسر (د) و پاییز در دو منطقه رامسر (ه) و بابلسر (ی) به همراه نیمرخ شوری در هر منطقه به تفکیک فصل. نیمرخ های شوری در هر ایستگاه با گام (PSU)  $0/5$  از ایستگاه قبلی.

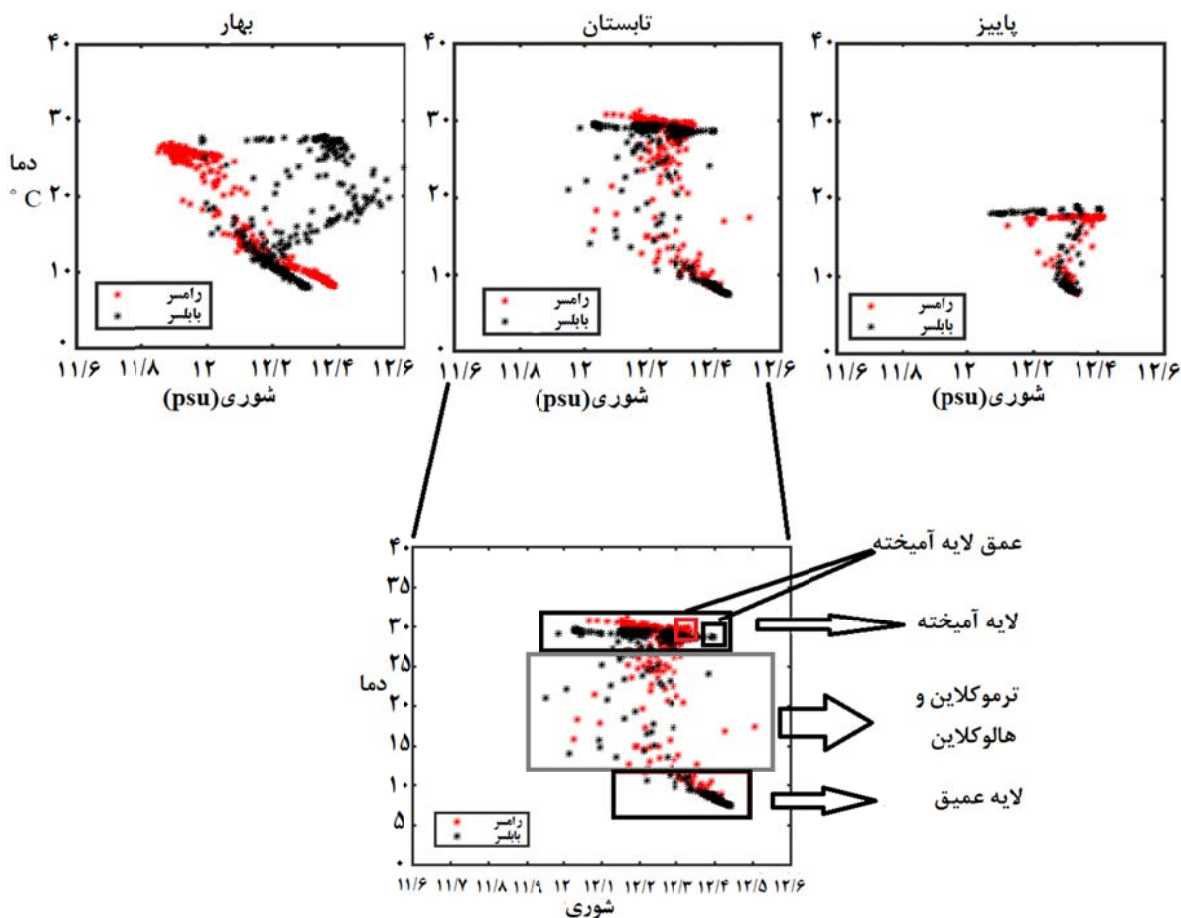


آمیخته ای به روشنی وجود ندارد. به منظور نمایش همزمان تغییرات شوری و دما، نمودار دما-شوری (T-S) در فصل‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. براساس این نمودار، در لایه ترموکلاين نوسان شوری کمی بیشتر از نوسان در سایر لایه‌ها است. لایه عمیق نیز دارای کمترین تغییرات دما-شوری است. همان‌طور که قابل مشاهده است در پاییز تغییرات شوری کمتر از دو فصل دیگر است و بیشترین تغییرات شوری را در بهار شاهد هستیم، به طوری که نوسانات شوری در فصل بهار و در بابلسر بیشتر از رامسر است. همچنین در پاییز و تابستان در منطقه رامسر کاملاً مشابه منطقه بابلسر است. شوری لایه آمیخته در بهار رامسر به شکل قابل ملاحظه‌ای کم شورتر از بابلسر است و بیشینه مقدار شوری در لایه آمیخته در رامسر کمتر از بیشینه شوری در بابلسر است. در این شکل نقطه متناظر با MLD با مربع روی این منحنی نشان داده شده است. چنانچه در شکل مشهود است مکان مربع‌ها در نمودار T-S جایی است که پس از آن تمرکز نقاط بسیار کاهش و پراکندگی نقاط افزایش می‌یابد که نشانگر ترموکلاين و هالوکلاين می‌باشد. پس از آن در لایه عمیق مجدداً نوسانات شوری-دما به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد.

با توجه به مشخصات ساختار قائم نیم‌رخ‌های دمای دارای حداقل دو لایه آمیخته و ترموکلاين، می‌توان ساختارهای لایه آمیخته مشاهده شده را به سه نوع اصلی تقسیم کرد. این سه نوع عبارت‌است از کلاسیک، پله‌ای و شیب‌دار که مثال‌هایی از این سه نوع در شکل ۴ نشان داده شده است. در نوع کلاسیک که شامل داده‌های پاییز هستند، لایه آمیخته تقریباً همدم (Isothermal) است و تقریباً گرادیان دمایی قابل توجهی در لایه آمیخته دیده نمی‌شود و مرز میان لایه آمیخته و ترموکلاين زیرین آن دارای گرادیان تند دمایی است به طوری که تغییرات دمایی در لایه آمیخته در این نوع به ندرت فراتر از  $0.5^{\circ}\text{C}$  می‌رود. در نوع پله‌ای که معمولاً داده‌های تابستانی در این نوع دسته‌بندی جای می‌گیرند، دما در لایه آمیخته با یک یا تعداد بیشتری پله کاهش می‌یابد و در زیر آن ترموکلاين فصلی با گرادیان دمایی بسیار زیاد قرار دارد. مجموع این پله‌های کوچک در نیم‌رخ دما معمولاً بیش از  $0.5^{\circ}\text{C}$  کاهش دارد. در نوع شیب‌دار که معمولاً شامل داده‌های بهار هستند، معمولاً دما با شیب ملایم به آرامی کاهش می‌یابد تا به ترموکلاين فصلی برسد. به همین علت تفکیک میان مرز لایه آمیخته و ترموکلاين به سختی انجام می‌گیرد. به همین علت در بعضی از ایستگاه‌ها حتی لایه



شکل ۴. انواع مختلف ساختار هیدروگرافی دما، بهار نوع چینه‌بندی، تابستان نوع پله‌ای پاییز نوع کلاسیک.



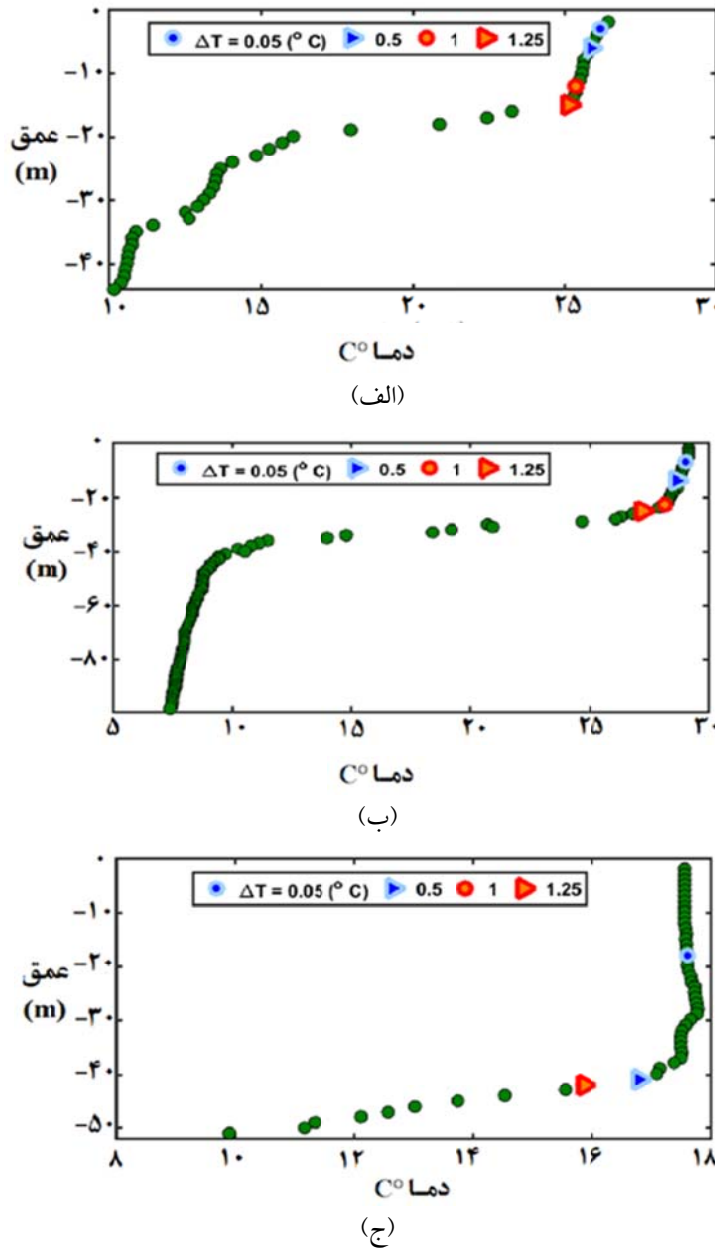
شکل ۵. نمودار دما بر حسب شوری (T-S) در دو منطقه بابلسر و رامسر در سه فصل بهار، تابستان و پاییز. عمق لایه آمیخته عمیق‌ترین ایستگاه اندازه‌گیری در شکل زیرین با مربع نشان داده شده است.

#### ۴-۲. تخمین MLD

در این بخش از مطالعه MLD با استفاده از دو روش چشمی و آستانه (با مقادیر آستانه ۰/۰۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۲۵) تخمین زده شد. سپس همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، به منظور انتخاب آستانه مناسب، برآورد بصری و آماری میان اعماق چشمی و تخمین‌زده‌شده انجام شد. در این بخش از تحقیق مقادیر آستانه بدون در نظر گرفتن و با در نظر گرفتن تفکیک فصلی بررسی شد که در ادامه به آن می‌پردازیم. در این محاسبات داده‌های مربوط به ۳۵ اندازه‌گیری که دارای حداقل دو لایه آمیخته و لایه ترموکلاین بود، در نظر گرفته شد.

#### ۴-۲-۱. بدون تفکیک فصلی

در این بخش از تحقیق عمق لایه آمیخته با استفاده از مقادیر مختلف آستانه بدون در نظر گرفتن فصل برای تمام اندازه‌گیری‌ها دو منطقه تخمین زده شد. شکل ۶ مثالی از اعماق تخمین‌زده‌شده لایه آمیخته با استفاده از روش آستانه و با مقادیر آستانه مختلف، بر پایه نیم‌رخ دما در منطقه رامسر را نشان می‌دهد. چنانچه قابل مشاهده است، نزدیک‌ترین مقدار آستانه به MLD در سه فصل پاییز، تابستان و بهار به ترتیب مقادیر آستانه ۰/۵ (°C)، ۱ (°C) و ۱/۲۵ (°C) می‌باشد.



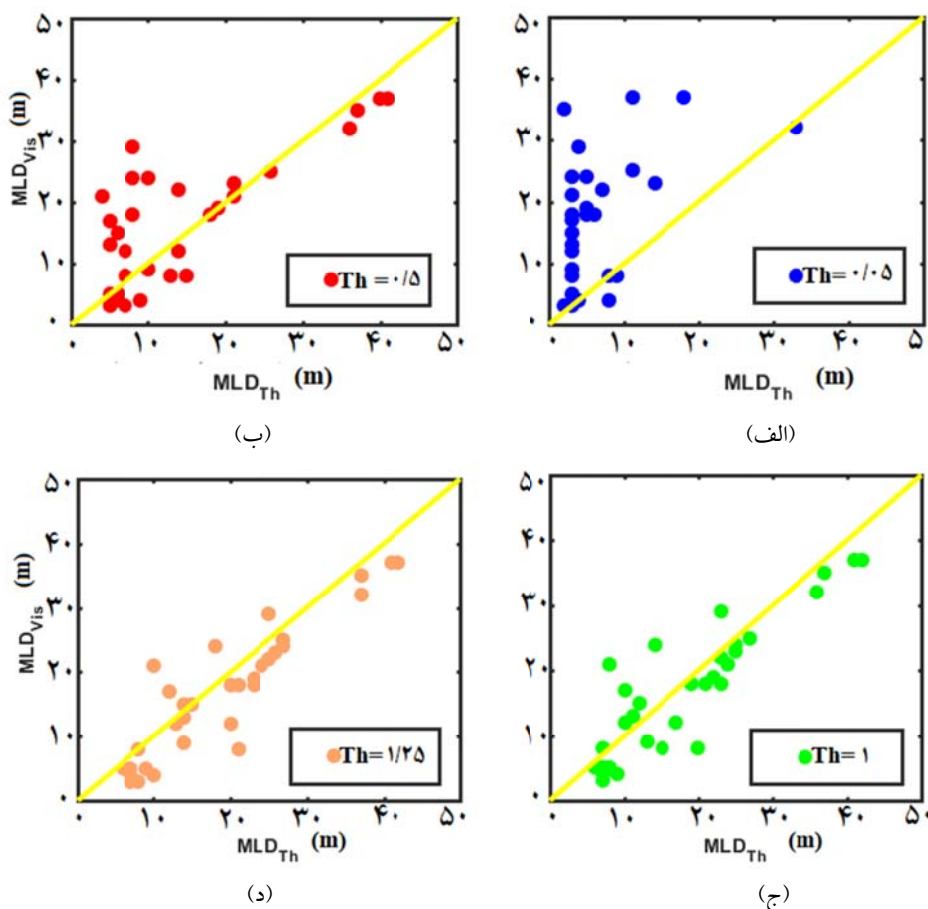
شکل ۶. تخمین عمق لایه آمیخته با استفاده از روش آستانه، با آستانه‌های مختلف در فصل‌های الف) بهار، ب) تابستان و ج) پاییز ۹۱ در منطقه رامسر. نقاط سبز رنگ نشان‌دهنده دما در اعماق مختلف است.

بررسی شد و MLD بالای ترموکلاين فصلی جایی در نظر گرفته شد که پس از آن دما با عمق به شدت تغییر می‌کرد. لازم به ذکر است که روش چشمی تخمین MLD تنها به منظور اعتبارسنجی اولیه روش تخمین MLD به کار می‌رود که پس از به دست آوردن مقدار مطلوب آستانه، در مطالعات پیش رو از MLD های به دست آمده از روش

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، به دلیل وجود نوسانات موجود در نیم‌رخ دما، گاهی MLD های تخمین زده شده به طرز فاحشی با مقدار واقعی خود تفاوت دارند. از همین رو و به منظور حذف MLD های بسیار دور از واقعیت MLD ها به صورت چشمی نیز تخمین زده شد. به این صورت که نیم‌رخ دمای مربوط به هر ایستگاه با دقت

به منظور سنجش دقیق تر و انتخاب آستانه مناسب تر در تخمین  $MLD_{Th}$ ، شاخص های آماری که در روابط ۱-۴ مشخص شدند اعم از  $RMSE$ ،  $MAE$ ،  $RAE$  و  $R^2$  میان  $MLD_{Th}$  و  $MLD_V$  محاسبه شد. در جدول ۱ خلاصه ای از شاخص های آماری محاسبه شده برای کل  $MLD$  های تخمین زده شده در هر سه فصل ارائه شده است. همان طور که در جدول نشان داده شده است،  $MLD_{Th}$  با مقدار آستانه  $1/25$  ( $^{\circ}C$ ) در تمامی شاخص ها سازگاری خوبی با  $MLD_V$  دارد. این نتایج با نتایج به دست آمده توسط دبیر مونتگوت و همکاران (۲۰۰۴) در آب های مدیترانه، که برای محاسبه  $MLD$  از آستانه  $0/5$  استفاده کردند سازگاری خوبی دارد. همچنین ولر و پلودمن (۱۹۹۶)،  $MLD$  را با آستانه  $0/1$  ( $^{\circ}C$ ) محاسبه کردند.

محاسباتی (در اینجا روش آستانه) استفاده شده است. به منظور مقایسه اعماق تخمین زده شده از روش های چشمی و آستانه با مقادیر مختلف آستانه، اعماق تخمین زده شده برای هر مقدار آستانه در مقابل مقادیر چشمی رسم شد (شکل ۷). هر چه تجمع نقاط حول خط  $45^{\circ}$  (خط زرد) بیشتر باشد نشان دهنده نزدیکی  $MLD$  های تخمین زده شده با استفاده از دو روش چشمی و آستانه با مقادیر مختلف آستانه است. چنانچه در شکل ۷-الف و ب مشهود است، مقادیر آستانه  $0/5$  ( $^{\circ}C$ ) و  $0/1$  ( $^{\circ}C$ ) مقدار  $MLD_{Th}$  را به شکل قابل توجهی کمتر از مقدار چشمی ( $MLD_V$ ) تخمین می زنند. از طرفی تجمع نقاط حول خط  $45^{\circ}$  برای مقادیر آستانه  $1$  ( $^{\circ}C$ ) و  $1/25$  ( $^{\circ}C$ ) نشان می دهد که این مقادیر آستانه  $MLD_{Th}$  را نزدیک به  $MLD_V$  تخمین می زنند.



شکل ۷. مقایسه میان  $MLD$  های چشمی و  $MLD$  های تخمین زده شده با استفاده از روش آستانه و مقادیر آستانه الف)  $0/5$  ( $^{\circ}C$ ) ب)  $0/1$  ( $^{\circ}C$ ) ج)  $1$  ( $^{\circ}C$ ) د)  $1/25$  ( $^{\circ}C$ ). اعماق لایه آمیخته چشمی و  $MLD_{Th}$  اعماق لایه آمیخته تخمین زده شده با استفاده از روش آستانه است.

## ۴-۲. با تفکیک فصلی

عمق لایه آمیخته با مقادیر آستانه مختلف به تفکیک فصل تخمین زده شد و شاخص‌های آماری تعریف شده در روابط ۴-۱ برای هر فصل به طور جداگانه محاسبه شد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲، برای فصل‌های بهار، تابستان و پاییز به ترتیب مقدار آستانه  $(1/25)^\circ\text{C}$ ،  $1^\circ\text{C}$  و  $(0/5)^\circ\text{C}$  بهترین جواب را می‌دهد. این نتایج با انواع MLD معرفی شده در بخش ۴-۱ همخوانی دارد. از آنجاکه در پاییز به علت سرمای هوا و سرعت بالای باد نه تنها عمق لایه آمیخته افزایش می‌یابد، بلکه به علت آمیختگی زیاد تغییرات دما در داخل MLD ناچیز است و

به عنوان دیگر MLD تقریباً همدماست (نوع کلاسیک). در فصل بهار سرعت باد کمتر از پاییز است و از طرفی افزایش دما و بارش بیشتر نسبت به تابستان باعث لایه بندی MLD (نوع شیب دار) می‌شود. به همین علت تغییرات دما درون MLD در این فصل بیشترین مقدار  $(1/25)^\circ\text{C}$  است. در فصل تابستان به علت گرمای هوا، پایین بودن سرعت باد و بارش کم، آمیختگی ستون آب بسیار کم تر از پاییز است ولی تبخیر زیاد سطحی و همچنین دمای بالای هوا منجر به پله‌ای شدن MLD می‌شود، به طوری که مقدار آستانه بهینه برای تخمین MLD در تابستان کمتر از بهار و بیشتر از پاییز به دست می‌آید  $(1^\circ\text{C})$ .

جدول ۱. شاخص‌های تطابق آماری میان  $MLD_{Th}$  و  $MLD_V$  برای آستانه‌های متفاوت. مقادیر مشخص شده با پس زمینه خاکستری بیانگر بهترین آستانه می‌باشد.

شاخص	آستانه $(0/05)$	آستانه $(0/5)$	آستانه $(1)$	آستانه $(1/25)$
MAE (m)	۱۰/۹۳	۵/۳۳	۴	۳/۹
RMSE (m)	۱۳/۷۸	۷/۶۳	۵	۴/۸
RAE	۱/۳۱	۰/۶۴	۰/۴۸	۰/۴۷
RSqr	۰/۲۳	۰/۵۸	۰/۷۸	۰/۸۳

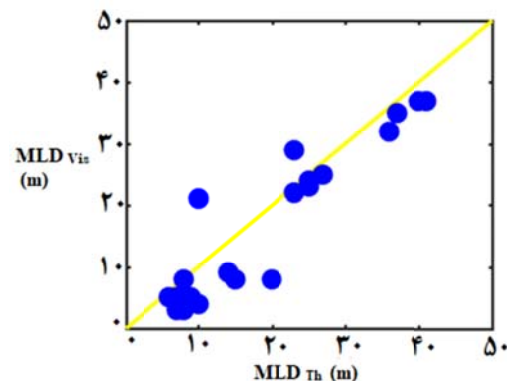
جدول ۲. شاخص‌های تطابق آماری میان  $MLD_{Th}$  و  $MLD_V$  به تفکیک فصل برای آستانه‌های مختلف. مقادیر مشخص شده با پس زمینه خاکستری بیانگر بهترین آستانه می‌باشد.

فصل	شاخص آماری	آستانه $0/05$	آستانه $0/5$	آستانه $1$	آستانه $1/25$
بهار	MAE (m)	۶/۴۶	۵/۱۳	۳/۸۰	۳/۲۶
	RMSE (m)	۸/۴۸	۷/۰۰	۴/۷۶	۴/۳۲
	RAE	۸/۴۸	۱/۰۲	۰/۷۶	۰/۶۵
	Rsqr	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۳۱	۰/۴۵
تابستان	MAE (m)	۱۳/۲۱	۶/۱۴	۴/۳۵	۴/۵۳
	RMSE (m)	۱۴/۸۰	۹/۰۲	۵/۴۵	۵/۳۹
	RAE	۲/۷۶	۱/۲۸	۰/۹۱	۱/۰۵
	Rsqr	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۰	۰/۲۹
پاییز	MAE (m)	۱۹/۷۵	۳/۲۵	۳/۷۵	۴/۰۰
	RMSE (m)	۲۳/۰۵	۳/۳۵	۳/۹۰	۴/۱۸
	RAE	۱۱/۲۸	۱/۸۵	۲/۱۴	۲/۲۸
	Rsqr	۰/۳۷	۰/۸۴	۴/۰۰	۰/۷۱

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه CTD در سه فصل بهار، تابستان و پاییز در سال ۱۳۹۱، در دو منطقه بابلسر و رامسر مورد استفاده قرار گرفت. طبق نتایج به‌دست آمده، MLD در هر دو منطقه با افزایش شدت باد و کاهش دما در پاییز به بیشینه مقدار و با افزایش دما و بارش در بهار به کمینه مقدار خود رسید. به‌طور کلی گستره تغییرات دما و شوری در دو منطقه قابل مقایسه بود. در بهار و تابستان در هر دو منطقه شوری نوسانات بیشتری نسبت به پاییز داشت و در بهار در منطقه شرقی در بابلسر در لایه ترموکلاين نسبت به بخش غربی در رامسر، شاهد نوسانات بیشتر در نمودار شوری بودیم. از طرفی طبق نتایج به‌دست آمده، برخلاف تعریف معمول هالوکلاين به‌عنوان ناحیه‌ای که در آن شوری با افزایش عمق، افزایش شدید دارد، هالوکلاين در خزر جایی است که نوسانات شوری در آن بالاست و عمق آن به‌طور تقریبی با عمق ترموکلاين برابر است. در تمامی مکان‌ها و فصل‌ها عمق لایه آمیخته در نقطه تغییر انحنای منحنی دما-شوری قرار گرفت. با توجه به مشخصات ساختار قائم نیم‌رخ‌های دما می‌توان ساختار لایه آمیخته را به سه نوع اصلی کلاسیک، شیب‌دار و پله‌ای که به ترتیب در فصل پاییز، بهار و تابستان مشاهده می‌شود، تقسیم کرد. در این تحقیق با استفاده از روش آستانه و با آستانه‌های  $(0.05^\circ\text{C})$ ،  $(0.1^\circ\text{C})$  و  $(0.25^\circ\text{C})$  عمق لایه آمیخته تخمین زده شد. به‌منظور برآورد میزان نزدیکی MLDهای تخمین زده شده به واقعیت، با استفاده از روش بصری و آماری MLDهای تخمین زده شده و چشمی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج این مقایسه نشان داد که بدون تفکیک فصلی برای تمامی نیم‌رخ‌های شامل حداقل لایه آمیخته و ترموکلاين، آستانه  $(0.25^\circ\text{C})$  در قیاس با بقیه مقادیر آستانه عمق لایه آمیخته را به‌خوبی تخمین زد. با در نظر گرفتن تفکیک فصلی بهترین مقدار آستانه برای فصل‌های پاییز، بهار و تابستان به ترتیب  $(0.5^\circ\text{C})$  و  $(0.25^\circ\text{C})$  و  $(0.25^\circ\text{C})$  و  $(1^\circ\text{C})$  به‌دست آمد که در نهایت الگوریتم

به‌منظور بهبود تخمین‌ها و نزدیک‌تر کردن MLDهای تخمین زده شده به واقعیت، اعماق MLD با مقادیر آستانه ترکیبی مورد استفاده قرار گرفت. به این معنای که برای اندازه‌گیری‌های پاییز، تابستان و بهار به ترتیب از آستانه‌های  $(0.5^\circ\text{C})$ ،  $(1^\circ\text{C})$  و  $(0.25^\circ\text{C})$  استفاده شد. در شکل ۸ MLDهای تخمین زده شده بر حسب MLDهای چشمی رسم شده‌اند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، تمرکز بالای نقاط حول خط  $45^\circ$  نشان‌دهنده مقدار قابل قبول MLDهای تخمین زده شده با استفاده از آستانه‌های ترکیبی می‌باشد. از طرفی مقادیر شاخص‌های آماری محاسبه شده میان  $MLD_{Th}$ های ترکیبی و  $MLD_V$  که در جدول ۳ آورده شده است، نشان می‌دهد که آستانه ترکیبی به‌خوبی MLD را تخمین می‌زند.



شکل ۸. مقایسه میان MLDهای چشمی و MLDهای تخمین زده شده با استفاده از روش آستانه و مقادیر آستانه ترکیبی  $MLD_{Vis}$  اعماق لایه آمیخته چشمی،  $MLD_{Th}$  اعماق لایه آمیخته تخمین زده شده با استفاده از الگوریتم ترکیبی آستانه، برای پاییز  $(0.5^\circ\text{C})$ ، تابستان  $(1^\circ\text{C})$  و بهار  $(0.25^\circ\text{C})$ .

جدول ۳. شاخص‌های تطابق آماری میان  $MLD_{Th}$  و  $MLD_{Vis}$  با مقادیر آستانه ترکیبی پاییز  $(0.5^\circ\text{C})$ ، تابستان  $(1^\circ\text{C})$  و بهار  $(0.25^\circ\text{C})$ .

شاخص آماری	آستانه فصلی
MAE (m)	۳/۷
RMSE (m)	۴/۷۴
RAE	۰/۴۵
RSqr	۰/۸

نیمکره شمالی. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۱۳۹۴، ۶ (۱۱)، ۹۰-۱۰۰

علیزاده کتکک لاهیجانی، ح.، نادری بنی، ع.، مهدی پور، ن.، عباسیان، ه.، صالح، ا.، پور کرمان، م.، گریوانی، ه.، امجدی، ص.، حسین دوست، م.، حبیبی، پ.، رمضانی، ا.، رهنما، ر.، حمزه پور، ع.، سید ولی زاده، م. م.، شیجونی فومنی، ن. و دالوند، م.، ۱۳۹۳، پیش محیطی و پردازش داده های دریایی خزر، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، انتشارات پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، پژوهشکده علوم دریایی، ۷۳۰.

ترکیبی از مقادیر آستانه فصلی برای تخمین MLD های نهایی مورد استفاده قرار گرفت. بررسی تغییرات فصلی MLD نشان داد که MLD در پاییز بیشترین مقدار و در بهار کمترین مقدار را دارد. مقایسه مکانی MLD در دو منطقه بابلسر و رامسر نشان داد که این لایه در منطقه رامسر در هر سه فصل بیشتر از منطقه بابلسر است.

### مراجع

پیرنیا، ع. و حبیب نژاد روشن، م. و سلیمانی، ک.، ۱۳۹۱، بررسی تغییرات دما و بارندگی در سواحل جنوبی دریای خزر و مقایسه آن با تغییرات درمقیاس جهانی و

- Afsharian, S. and Taylor, P. A., 2019, On the potential impact of Lake Erie wind farms on water temperatures and mixed layer depths: Some preliminary 1-D modelling using COHERENS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*.
- Dawson, C. W., Abrahart, R. J. and See, L. M., 2007, HydroTest: a web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling and Software*, 22(7), 1034-1052.
- De Boyer Montégut, C., Madec, G., Fischer, A. S., Lazar, A. and 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).
- D'Ortenzio, F., Lavigne, H., Besson, F., Claustre, H., Coppola, L., Garcia, N. and Morin, P., 2014, Observing mixed layer depth, nitrate and chlorophyll concentrations in the northwestern Mediterranean: A combined satellite and NO<sub>3</sub> profiling floats experiment. *Geophysical Research Letters*, 41(18), 6443-6451.
- Dutkiewicz, S., Follows, M., Marshall, J. and Gregg, W. W., 2001, Interannual variability of phytoplankton abundances in the North Atlantic. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 48, 2323-2344.
- Gaube, P., J. McGillicuddy Jr, D. and Moulin, A. J., 2019, Mesoscale eddies modulate mixed layer depth globally. *Geophysical Research Letters*, 46(3), 1505-1512.
- Falkowski, P. G., Barber, R. T. and Smetacek, V., 1998, Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281(5374), 200-206.
- Jamshidi, S., Bakar, A. and Noordin, M., 2010, Temperature, salinity and density measurements in the coastal waters of the Rudsar, South Caspian Sea. *Journal of the Persian Gulf*. 2010. 1(1), 36-27.
- Kantha L. and Clayson C. A., 2003, Ocean Mixed Layer, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*,: 291-892.
- Kara, A. B., Rochford, P. A. and Hurlburt, H. E., 2000, An optimal definition for ocean mixed layer depth. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C7), 16803-16821.
- Keerthi, M. G., Lengaigne, M., Vialard, J., de Boyer Montégut, C. and Muraleedharan, P. M., 2013, Interannual variability of the Tropical Indian Ocean mixed layer depth. *Climate dynamics*, 40(3-4), 743-759.
- Kelly, K. A. and Qiu, B., 1995, Heat flux estimates for the western North Atlantic. Part I: Assimilation of satellite data into a mixed layer model. *J. Phys. Oceanogr.*, 25, 2344-2360.
- Kostianoy, A. G. and Kosarev, A. N. (Eds.), 2005, *The Caspian Sea Environment* (Vol. 5). Springer Science and Business Media.
- Lamb, P. J., 1984, On the mixed layer climatology of the north and tropical Atlantic. *Tellus A*, 36, 292-305.
- Lavigne, H., D'Ortenzio, F., Migon, C., Claustre, H., Testor, P., d'Alcalà, M. R., Lavezza, R., Houpert, L. and Prieur, L., 2013, Enhancing the comprehension of mixed layer depth control on the Mediterranean phytoplankton phenology. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 3416-3430.
- Lukas, R. and Lindstrom, E., 1991, The mixed layer of the western equatorial Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(S01), 3343-3357.

- Manly, B. F. and Alberto, J. A. N., 2016, Multivariate statistical methods: a primer. Chapman and Hall/CRC.
- Monterey, G. I. and S. Levitus, 1997, Seasonal Variability of Mixed Layer Depth for the World Ocean, NOAA atlas Nesdis, Vol. 14, U. S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C., 100 pp.
- Nahavandian E. S., 2014, Temporal and spatial evolution of the mixed layer in the southern Beaufort Sea and the Amundsen Gulf. Doctoral dissertation, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique (INRS).
- Obata, A., J. Ishizaka and M. Endoh, 1996, Global verification of critical depth theory for phytoplankton bloom with climatological in situ temperature and satellite ocean color data. *J. Geophys. Res.*, 101, 20657-20667, doi: 10.1029/96JC01734.
- Oey, L., Chang, Y. L., Lin, Y. C., Chang, M. C., Xu, F. and Lu, H. F., 2012, ATOP-The advanced Taiwan Ocean Prediction System based on the mpiPOM. Part1: Model Descriptions, Analysis and Results, *Terr. Atmos. Sci* ; Vol. 24, No. 1, 137-158.
- Papadakis, J. E., 1981, Determination of the wind mixed layer by an extension of Newton's method. *Pacific Marine Sci. Rep.* 81-9, Institute of Ocean Sciences, Sidney, BC, Canada.
- Peeters, F., Kipfer, R., Achermann, D., Hofer, M., Aeschbach-Hertig, W., Beyerle, U., Imboden, D. M., Rozanski, K. and Fröhlich, K., 2000, Analysis of deep-water exchange in the Caspian Sea based on environmental tracers. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 47(4), 621-654.
- Pickart, R. S., Torres, D. J. and Clarke, R. A., 2002, Hydrography of the Labrador Sea during active convection. *Journal of Physical Oceanography*, 32, 428-457.
- Price, J. F., Weller, R. A. and Pinkel, R., 1986, Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling and wind mixing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C7), 8411-8427.
- Qu, T., Du, Y., Gan, J. and Wang, D., 2007, Mean seasonal cycle of isothermal depth in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C2).
- Schneider, N. and Müller, P., 1990, The meridional and seasonal structures of the mixed-layer depth and its diurnal amplitude observed during the Hawaii-to-Tahiti Shuttle experiment. *Journal of physical oceanography*, 20, 1395-1404.
- Simpson, J. H. and Sharples, J., 2012, Introduction to the physical and biological oceanography of shelf seas. Cambridge University Press.
- Stewart, R. H., 2008, Introduction to physical oceanography. Robert H. Stewart.
- Tai, J. H., Wong, G. T. and Pan, X., 2017, Upper water structure and mixed layer depth in tropical waters: The SEATS station in the northern South China Sea. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28(6).
- Thompson, R. O., 1976, Climatological numerical models of the surface mixed layer of the ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 6(4), 496-503.
- Thomson, R. E. and Fine, I. V., 2003, Estimating mixed layer depth from oceanic profile data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, 319-329.
- Toole, J. M., Timmermans, M. L., Perovich, D. K., Krishfield, R. A., Proshutinsky, A. and RichterMenge, J. A., 2010, Influences of the ocean surface mixed layer and thermohaline stratification on Arctic Sea ice in the central Canada Basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C10).
- Wagner, R. G., 1996, Mechanisms controlling variability of the interhemispheric sea surface temperature gradient in the tropical Atlantic. *Journal of Climate*, 9(9), 2010-2019.
- Weller, R. A. and Plueddemann, A. J., 1996, Observations of the vertical structure of the oceanic boundary layer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C4), 8789-8806.
- Wyrtki, K., 1964, The thermal structure of the eastern Pacific Ocean. *Dtsch. Hydrogr. Z.*, 8A, 6-84.
- Xu, Y., Cahill, B., Wilkin, J. and Schofield, O., 2013, Role of wind in regulating phytoplankton blooms on the Mid-Atlantic Bight. *Continental Shelf Research*, 63, S26-S35.
- Yeh, S. W., Yim, B. Y., Noh, Y. and Dewitte, B., 2009, Changes in mixed layer depth under climate change projections in two CGCMs. *Climate dynamics*, 33(2-3), 199-213.



## Seasonal variations of the water column structure and estimation of the mixed layer depth based on the temperature using threshold method in Babolsar and Ramsar regions

Jannar Fereidouni, F.<sup>1</sup>, Nahavandian Esfahani, S.<sup>2\*</sup> and Mahmoudi, N.<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student, Department of Marine Physics, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modarres University, Nur, Iran

2. Assistant Professor, Department of Marine Physics, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modarres University, Nur, Iran

3. Assistant Professor, Department of Fisheries Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modarres University, Nur, Iran

(Received: 3 Sep 2019, Accepted: 21 Jan 2020)

### Summary

The physical processes play an important role on the biochemical phenomenon in the seas and oceans. The Mixed layer is the surface layer in which due to the air-sea exchange, the physical parameters such as temperature, salinity and density are almost constant. The layer beneath the mixed layer where the gradient of the physical parameters is large, is called thermocline, halocline and pycnocline, respectively in the temperature, salinity and density profiles. The deep part is the deepest layer where the physical parameters are nearly constant. Because the mixed layer acts as an interface between the atmosphere and deeper layers of the sea, its depth is not only influenced by weather but also strongly impacts the climate change. The mixed layer depth (MLD) has an important role in biochemical processes, gas exchanges, transferring heat, mass and momentum between the atmosphere and the sea. In this study seasonal and spatial variations of the MLD as well as the temperature and the salinity profiles are investigated in the Southern Caspian Sea in the Babolsar and Ramsar regions based on the Conductivity-Temperature-Depth (CTD) measurements conducted during fall, spring and summer 2012. According to the observations, despite the fact that the range of variations of the temperature and the salinity in the Babolsar and Ramsar is comparable, during the spring the salinity fluctuation inside the halocline is larger in Babolsar. It is worth to mention that the salinity fluctuates highly inside the halocline, contrary to the classic definition that the salinity increases with depth inside the halocline. The MLD has been estimated using the threshold method with four different threshold values (0.05, 0.5, 1 and 1.25 (°C)). In order to avoid erroneous estimation of MLD (very extreme values), each temperature profile is also carefully examined by visual investigation. Then visual inspection and statistical analysis approaches have been employed to assess the most appropriate threshold value. To this end, calculated MLDs using different threshold values have been plotted against visual MLDs. Large number of points away from line of 45° shows that the calculated MLDs using related threshold value is biased against visual MLDs. While the largest number of points around 45° line demonstrates that the MLDs estimated by both methods are similar to each other and the considered threshold value is an appropriate one. The results reveal that the seasonal hybrid algorithm with threshold values of 0.5 (°C) for fall, 1 (°C) for summer, and 1.25 (°C) for spring gives the best estimation for the MLDs. The calculated MLDs show that the MLD is maximum in the fall and minimum in the spring which is in agreement with Jamshidi et al. (2010). The reason for a deeper MLD in the summer compared to the spring can be related to the high evaporation during this season, which leads to salinity increase at the surface and augmentation of the convection. Spatial comparison of the MLDs in Babolsar and Ramsar regions shows that the MLD is slightly deeper in Ramsar and the gradient of the temperature just below the mixed layer in Ramsar is larger compared with that in Babolsar. The vertical structure of the mixed layer can be sub-divided into three principle types: the classical, stepwise and inclined types. The classical and stepwise type profiles are similar to the results reported by Tai et al. (2017) conducted in the principle northern South China Sea. The classical type has quasi isothermal mixed layer followed by a steep thermocline which is the most observed in the fall. In the stepwise type, the temperature decreases inside the mixed layer with one or more small steps before drastical decrease in the seasonal thermocline. The stepwise type has been observed more often during the summer. Finally in the inclined type which is occurred in the spring, the MLD's temperature gently decreases with depth followed by an abrupt decrease of the temperature in the thermocline.

**Keywords:** Caspian Sea, Babolsar, Ramsar, mixed layer, mixed layer depth.

\* Corresponding author:

s.nahavandian@modares.ac.ir