

## تغییرات زمانی و مکانی دما و شوری سطح در خلیج اماندسن و جنوب دریای بوفورت واقع در اقیانوس منجمد شمالی کانادا

سمیه نهاوندیان اصفهانی

استادیار، هیات علمی گروه فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران، پست الکترونیکی: s.nahavandian@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۱۹

\* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۲۹

### چکیده

در تحقیق حاضر تغییرات مکانی و زمانی دما و شوری سطحی در خلیج اماندسن و دریای بوفورت واقع در قطب شمال کانادا، با استفاده از داده‌های CTD جمع آوری شده در گشت‌های تحقیقاتی CASES و CFL مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نقشه‌های پهنه بندی دما و شوری سطحی که با استفاده از تکنیک کریجینگ به دست آمد و همچنین نقشه‌های نقطه‌ای، نشان داد که به طور کلی شوری در خلیج اماندسن بیشتر از دریای بوفورت است. در زمانی که فراجوشی رخ ندهد (پاییز ۲۰۰۴)، شوری در جنوب دریای بوفورت به علت تاثیرپذیری از رواناب رودخانه مکنزی، کمینه است. در بهار ۲۰۰۴ و پاییز ۲۰۰۷ وقوع فراجوشی به علت انتقال آب‌های نسبتاً شور و گرم تابستانی آرام به سطح، منجر به افزایش قابل توجه شوری سطح گردید. فراجوشی پاییز ۲۰۰۷ به حدی قوی بود که اثرات آن حتی تا تابستان سال آینده باقی ماند و باعث ذوب یخ‌های موجود و تعویق تشکیل یخ در پاییز ۲۰۰۸ گردید.

کلمات کلیدی: تغییرات اقلیم، اقیانوس منجمد شمالی کانادا، خلیج اماندسن، دریای بوفورت، کریجینگ.

### ۱. مقدمه

گردش دما-شوری<sup>۱</sup>، گردش اقیانوسی در مقیاس بزرگ ناشی از گرادیان چگالی آب‌های جهانی است که به واسطه‌ی شار گرمای سطحی، آب‌های شیرین و برهمکنش آب‌های اقیانوس‌های دنیا ایجاد می‌شود. دما و شوری در تعیین چگالی، جریان و در نهایت گردش آب در اقیانوس‌ها نقش تعیین کننده‌ای دارند و گردش آبی که به واسطه اثر متقابل این دو عامل می‌شود، گردش دما-شوری نام دارد. به شکلی که آب گرم از عرض‌های پایین و میانی در سطح به سمت عرض‌های جغرافیایی بالا حرکت کرده و در نزدیکی قطب‌ها به علت سرمای زیاد چگالی آن افزایش یافته و به عمق فرومی‌روند. این چرخش جهانی، به شکل یک کمربند عمل می‌کند که کوچکترین تغییر در هرکدام از اقیانوس‌ها به

گرمایش زمین و تغییر اقلیم بطور مستقیم بر آب و هوای کره زمین و به ویژه منطقه‌ی شمالگان تأثیر گذاشته است. بطوریکه، این منطقه با روند فزاینده و چشمگیر کاهش یخ در طی سالهای اخیر مواجه شده است. به همین علت، ساختار و خصوصیات فیزیکی، زیستی و شیمیایی اقیانوس منجمد شمالی، بخصوص ویژگی‌های لایه سطحی اقیانوس تغییر یافته است. از آنجا که لایه سطحی اقیانوسی رابط بین جو و آب‌های عمیق‌تر اقیانوس است، در تعیین مشخصه‌ها و ساختار سایر لایه‌ها حائز اهمیت می‌باشد. لایه‌ی سطحی اقیانوسی نقش تعیین کننده‌ای در ساختار ستون آب دارد و از طرفی این لایه در اقیانوس منجمد شمالی و جنوبی در تعیین چرخه گرما-شوری جهانی نقش به‌سزایی ایفا می‌کند.

<sup>1</sup> Thermohaline Circulation (THC)

به سمت شمال لایه‌های سطحی اقیانوس اطلس و جریان‌های آب‌های سرد و عمیق به سمت جنوب قطبی به عنوان بخشی از چرخش ترموهاالاین تشکیل می‌گردد. AMOC مولفه بسیار مهم سیستم اقلیمی کل کره زمین است و نتیجه مشترک عوامل تاثیرگذار جوی و گردش ترموهاالاین است. از همین رو شناخت تغییرات دما و شوری لایه سطحی اقیانوس منجمد در شناخت چگونگی تغییرات کوتاه مدت اقلیمی و دراز مدت اقلیم حائز اهمیت است (Sena Martins و همکاران، ۲۰۱۴).

در مقاله حاضر ابتدا به معرفی منطقه مورد مطالعه و گشت‌های تحقیقاتی که داده‌های اندازه‌گیری در جریان آن‌ها فراهم شده، پرداخته شده است. سپس با استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده توسط روش کریجینگ و همچنین نقشه‌های نقطه‌ای دما و شوری به مقایسه فصلی و سالانه دما و شوری سطحی آب در پاییز و تابستان ۲۰۰۳-۲۰۰۴ و ۲۰۰۷-۲۰۰۸ پرداخته می‌شود و عوامل مختلف تاثیرگذار بر این تغییرات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱ منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق خلیج اماندسن<sup>۳</sup> و جنوب شرقی دریای بوفورت<sup>۴</sup> به عنوان بخشی از اقیانوس منجمد شمالی کانادا<sup>۵</sup> می‌باشد (شکل ۱). دریای بوفورت با مساحت حدود ۴۵۰,۰۰۰ کیلومتر مربع در شمال سواحل کانادا و آمریکا و یکی از دریا‌های بزرگ اقیانوس منجمد شمالی می‌باشد. یکی از مشخصه‌های دریای بوفورت، چرخاب سیکلونیک بوفورت<sup>۶</sup> که حرکت یخ و آب سطحی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. خلیج اماندسن واقع در جنوب شرقی دریای بوفورت توسط جزیره بنکس<sup>۷</sup> در شمال، جزیره ویکتوریا<sup>۸</sup> در شرق و سواحل قلمروهای شمال غرب<sup>۹</sup> کانادا در جنوب احاطه شده است و حدود ۴۰۰ کیلومتر طول و ۱۵۰ کیلومتر عرض بین جزیره بنکس

نقطه‌ی دیگر با فاصله بسیار دورتر منتقل می‌گردد. به عنوان مثال شاخص نوسان قطبی<sup>۱</sup> که یکی از شاخص‌های بسیار مهم جوی ست و نقش تعیین کننده ای بر جریان رانش قطبی (TDS) که عامل تاثیرگذار بر میزان خروج یخ‌ها از قطب شمال است (Wang و همکاران، ۲۰۰۹)، یکی از عوامل موثر بر الگوی دمایی خزر شمالی و همچنین میزان بارش حوزه آبریز ولگا که مهم‌ترین رودخانه‌های تغذیه کننده آب دریای خزر است، می‌باشد (Ghasemi و همکاران، ۲۰۰۷). به همین علت نقش قابل توجهی در تعدیل آب و هوای کره‌ی زمین بازی می‌کند (Swart و همکاران، ۲۰۰۴). از طرفی قطب شمال و جنوب مناطقی با سردترین اقلیم در کره‌ی زمین، بطور گسترده با یخ‌های انبوه و متنوع پوشیده شده و از این‌رو، از ویژگی‌های منحصربه‌فردی برخوردارند. یخ‌های قطبی به دلیل بازتاب زیاد اشعه تابشی نور خورشید و تعدیل حجم آب شیرین سطحی، در جریان دما-شوری بسیار تاثیر گذارند. روند گرمایش زمین بر روی قطب شمال بیشتر از سایر مناطق زمین تاثیر گذاشته است. با بررسی و مطالعات انجام شده توسط محققان، میزان پوشش یخ‌های تابستانی در اقیانوس منجمد شمالی به شدت کاهش یافته، به طوریکه در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ قطب شمال کمینه پوشش یخ را دارا بود (Comiso و همکاران، ۲۰۰۸، Wang و همکاران، ۲۰۰۹؛ NSIDC سپتامبر ۲۰۱۲). میانگین کمینه وسعت یخ در سال ۲۰۰۷-۲۰۰۸ حدود ۳۷٪ در مقایسه با میانگین تاریخی وسعت یخ بین سال‌های ۱۹۸۰-۱۹۹۹، کاهش داشت که رکورد کمترین میزان پوشش یخ را تا پیش از این سال به خود اختصاص داد (Polyakov و همکاران، ۲۰۱۲).

منبع اصلی گرمای اقیانوس، شار گرماییست که در تابستان از میان یخ‌گذرهای آزاد، یخ‌های شفاف و مناطق خالی از یخ، عبور می‌کند (Elder و Perovich، ۲۰۰۲). تمامی این تحولات منجر به تغییر خصوصیات آب‌های سطحی ناشی از افزایش میزان انرژی جذب شده‌ی خورشید در لایه‌های فوقانی اقیانوس به علت کاهش پوشش یخ و تشدید ذوب یخ شده است. از طرفی تغییرات دما و شوری لایه سطحی اقیانوس منجمد شمالی به طور مستقیم بر چگالی آب و شکل‌دهی توده‌های آب‌های عمیق و همچنین چرخش واژگونی نصف‌النهاری اطلس (AMOC<sup>۲</sup>) تاثیرگذار است. AMOC از برخورد جریان آب‌های گرم و شور

<sup>3</sup> Amundsen Gulf

<sup>4</sup> Beaufort Sea

<sup>5</sup> Canadian Arctic

<sup>6</sup> Beaufort Gyre

<sup>7</sup> Banks Island

<sup>8</sup> Victoria Island

<sup>9</sup> Northwest Territories

<sup>1</sup> Arctic Oscillation

<sup>2</sup> Atlantic Meridional Overturning Circulation

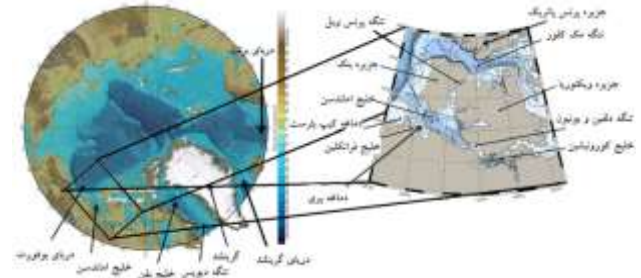
همکاران، ۲۰۰۸). گشت تحقیقاتی CFL دومین گشت تحقیقاتی متشکل از ۳۵۰ محقق از ۲۷ کشور دنیا بود که در جریان آن داده‌های یکساله از پاییز ۲۰۰۷ تا تابستان ۲۰۰۸ در قطب شمال جمع‌آوری شد (Barber و همکاران، ۲۰۱۰).

### ۳. تحلیل‌های زمین‌آمار

روش‌های مختلف درون‌یابی اعم از اسپلاین، کریجینگ، کوکریجینگ، رگرسیون کریجینگ به منظور تخمین مقدار پارامتر مورد نظر در خارج از نقاط اندازه‌گیری وجود دارد، که بسته به داده‌های موجود می‌توان از آنها استفاده کرد. به عنوان مثال مولوی عربشاهی و همکاران (۱۳۹۷) داده‌های بارش و دما را در جنوب دریای خزر در فصل‌های تابستان و زمستان با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده بین سال ۱۹۵۱ و ۲۰۱۷ درون‌یابی کردند. نتایج این تحقیقات نشان داد که درون‌یابی‌های نویل و اسپلاین تقریب دقیق‌تری ارائه می‌دهند. Garneau و همکاران (۲۰۰۶) شوری را در دریای بوفورت و خلیج اماندن با استفاده از کریجینگ معمولی برای داده‌های اندازه‌گیری شده در پاییز ۲۰۰۲ درون‌یابی کردند. نتیجه تحقیقات نشان دهنده افزایش شوری در نزدیک سواحل دریای بوفورت و کاهش آن در نقاط دور از ساحل به علت فراجوشی بود. در تحقیق حاضر به منظور محاسبه و ترسیم پراکنش مکانی دما و شوری سطح آب، از روش کریجینگ (برنامه کریجینگ ۶۱) نوشته شده و تحت اجرا در Matlab استفاده شده است.

در این تکنیک با استفاده از برون‌یابی در خارج از نقاط اندازه‌گیری، نقشه‌های پهنه‌بندی دما و شوری تهیه گردید. روش کریجینگ مقدار متغیر در نقطه نامعلوم را با جمع مقادیر معلوم (اندازه‌گیری شده) در همسایگی نقطه مورد نظر که بر حسب میزان همبستگی به همدیگر وزن‌دهی شده اند، تخمین می‌زند. مهم‌ترین بخش این تکنیک یافتن مناسب‌ترین مدل سمی-واریوگرام<sup>۴</sup> است. مدل انتخاب شده تعریف می‌کند که چطور یک پارامتر درون‌یابی شده در فضا تغییر می‌کند و چه رابطه‌ای بین مشاهدات مختلف در نقاط متفاوت بر اساس فاصله بین آنها وجود دارد (Journel و Huijbregts، ۱۹۷۸). در این تحقیق مدل انتخاب شده واریوگرام، نمایی می‌باشد.

و دماغه پترست<sup>۱</sup> دارد. خلیج اماندن یکی از دو محل ورود از سمت غرب به مجمع‌الجزایر کانادا است، که به علت تغییر اقلیم و اثرات ناشی از آن بر ذوب یخ، به عنوان یکی از مهم‌ترین مسیرهای کشتیرانی به سمت قطب شمال دارای اهمیت روزافزون است (Peterson و همکاران، ۲۰۰۸).



شکل ۱: نقشه اقیانوس منجمد شمالی و قطب شمال کانادا، تغییرات بر روی شکل گرفته شده از: (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/>) (arctic.html)

### ۲-۲ گشت‌های دریایی و داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه داده‌های CTD<sup>۳</sup> (دستگاهی برای تشخیص رسانایی و دما و تغییرات عمق در ستون آب که شامل حسگرهای مختلف) می‌باشد که در جریان گشت دریایی CASES در سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴ و گشت دریایی CFL در سال ۲۰۰۷-۲۰۰۸ جمع‌آوری شده‌اند.

گشت تحقیقاتی CASES با بودجه تخصیص داده شده توسط شورای تحقیقات مهندسی و علوم طبیعی کانادا (NSERC) و با هدف مطالعات در اقیانوس منجمد شمالی کانادا، بنیان گذاشته شد. این گشت مقدمات مطالعات گسترده و ارزشمند در قطب شمال کانادا را برای اولین بار فراهم نمود. این گشت برنامه مشترک بین‌المللی متشکل از ۴۴ مسئول و خدمه کشتی و ۳۸ محقق از ۹ کشور دنیا، به رهبری کانادا بود که به منظور درک خصوصیات بیوژئوشیمیایی و عواقب اکولوژیکی ناشی از تغییرات پوشش یخ در اقیانوس منجمد شمالی کانادا انجام شد. اندازه‌گیری‌ها در برنامه CASES در سال ۲۰۰۲ آغاز شد و برای اولین بار داده‌های یکساله کامل از پاییز ۲۰۰۳ تا تابستان ۲۰۰۴ در دریای بوفورت و خلیج اماندن جمع‌آوری گردید (Fortier و

<sup>1</sup> Cape Bathurt

<sup>2</sup> Canadian Archipelago

<sup>3</sup> Conductivity-Temperature-Depth

<sup>4</sup> Semi-variogramme

### ۳. نتايج و بحث

داده‌های ارائه شده در شکل ۲ مربوط به اندازه‌گیری‌های انجام شده در پاییز ۲۰۰۳ از ۲۰ سپتامبر تا ۲۰ نوامبر می‌باشد. دایره‌های رنگی در شکل ۲ الف توالی زمان اندازه‌گیری بر حسب روز سال و شکل ۲ ب و ج شوری و دما مرتبط را در همان ایستگاه نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، شوری در جنوب شرق دریای بوفورت در نزدیک ساحل کمینه و در حدود ۲۱-۲۳ است و با فاصله گرفتن از ساحل شوری افزایش می‌یابد. در همین محدوده دما نیز افزایش نسبی دارد. جنوب دریای بوفورت به طور کامل تحت تاثیر رودخانه مکنزی است که با جریان به طور متوسط  $9700 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$  چهارمین رودخانه بزرگ است که به اقیانوس منجمد شمالی می‌ریزد (Carmack و Macdonald, ۲۰۰۲).

شوری کم و دمای بیشتر در مقایسه با نقاط دیگر در جنوب دریای بوفورت تحت تاثیر خروجی رودخانه مکنزی است که حجم زیادی از آب شیرین و به طور نسبی گرم را در هر ثانیه به دریای بوفورت می‌ریزد. در نقشه نقطه‌ای رنگی شکل ۲ ج، در بیشتر نقاط اندازه‌گیری دما آب بین  $-1/5$  و  $-1/2$  است و در چند نقطه که با فلش و بیضی در شکل ۲ ج نشان داده شده است، دما اختلاف قابل توجهی در این نقاط با ایستگاه اندازه‌گیری مجاور خود دارد که نقشه نقطه‌ای و پهنه‌بندی را تبدیل به یک نقشه وصله‌ای<sup>۱</sup> کرده است. همانطور که در شکل ۲ الف نشان داده شده است، نقاط گرمی که با فلش و بیضی نشان داده شده اند در نمودار نقطه‌ای توالی روزانه مربوط به روزهای ابتدایی اندازه‌گیری  $(-0/1) - (-0/6) \text{ } ^\circ\text{C}$  در آغاز دوره مربوط به اوایل پاییز (در فاصله روزهای ۲۷۴-۲۸۶، معادل ۳۰ سپتامبر-۱۳ اکتبر) و نقاط مجاور با تفاوت دمای ملموس تا حدود  $-1/6 \text{ } ^\circ\text{C}$  مربوط به اندازه‌گیری‌ها در اواسط پاییز (در فاصله روزهای ۳۰۵-۳۲۵، معادل ۳۱ اکتبر-۲۰ نوامبر) می‌باشد.

این تفاوت دما و شوری در نقاط نزدیک به هم در خلیج فرانکلین نیز مشاهده شده است. اوایل پاییز دمای هوا و دمای سطح اقیانوس شروع به کاهش می‌کند و به دنبال آن آب‌های سطحی شروع به یخ زدن می‌کنند. در اواسط و اواخر پاییز عمق و سرعت ایجاد یخ افزایش می‌یابد و از آنجا که آب در حال یخ

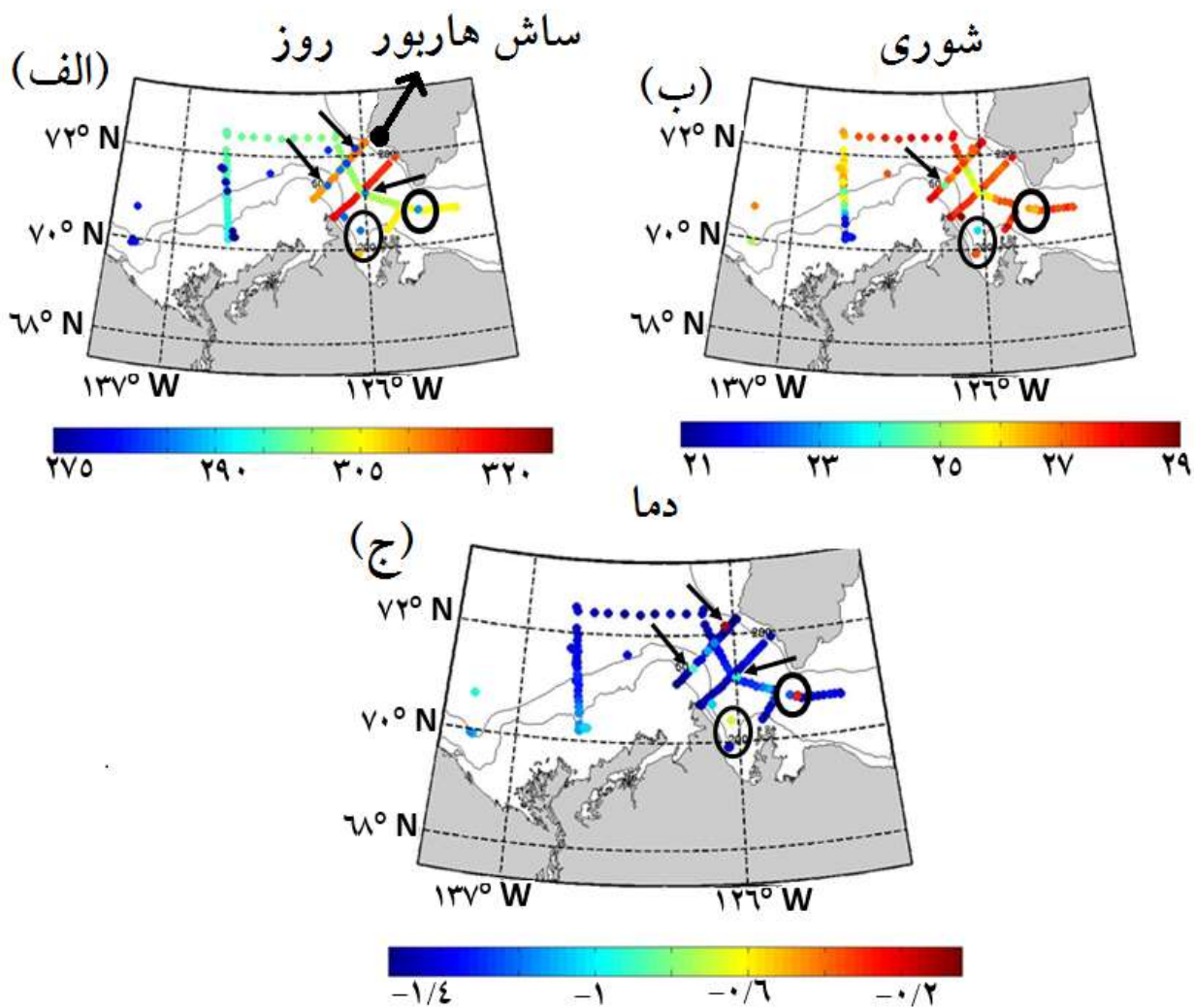
زدن نمک را پس می‌زند، با گذر زمان و با افزایش وسعت و عمق ایجاد یخ، شوری لایه سطحی افزایش می‌یابد. همین تغییرات در تفاوت زمان اندازه‌گیری ایستگاه‌های مجاور و دما و شوری متناظر با آنها در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

به منظور نمایش تغییرات مکانی دما و شوری در سطح با استفاده از تکنیک زمین‌آمار کریجینگ، نقشه‌های پهنه بندی دما و شوری متناظر با شکل ۲، تهیه شدند (شکل ۳). لازم به ذکر است در این شکل تغییرات زمانی نشان داده نشده است و بدون در نظر گرفتن تغییرات زمانی برون‌یابی‌ها انجام گرفته است. همانطور که پیشتر نیز بحث شد، آب‌های نزدیک ساحل جنوب دریای بوفورت گرم‌تر از نواحی دور از ساحل است. از طرفی شوری آب‌های سطحی این مناطق کم‌شورترین نقاط در کل ناحیه اندازه‌گیری است (بین ۲۱-۲۳).

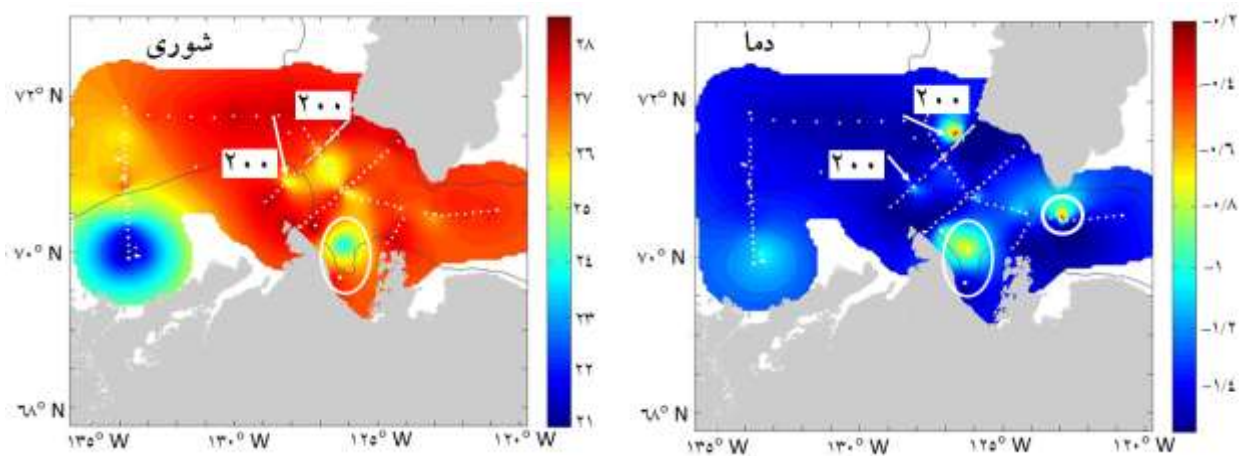
نواحی نشان داده شده با فلش و بیضی در نقشه دما، مربوط به خاصیت وصله‌ای (patchy) است که در نقشه نقطه‌ای رنگی در شکل ۲ نیز نشان داده شد. این تغییرات ناگهانی و زیاد به دو علت رخ می‌دهد. علت وصله‌ای بودن نقشه دما و شوری، علاوه بر تفاوت در زمان اندازه‌گیری دو نقطه مجاور و تاثیر آن بر دمای سطحی، خودهمبستگی پایین خصوصیات فیزیکی به خصوص دما در لایه سطحی نیز می‌باشد. لایه سطحی به خصوص لایه آمیخته به طور مستقیم تحت تاثیر تغییرات جوی می‌باشد و تغییرات ناگهانی و کوتاه مدت (ساعتی، روزانه و ماهانه) جوی به طور مستقیم بر آن تاثیر می‌گذارد (Nahavandian, ۲۰۱۴).

نقشه نقطه‌ای تغییرات زمانی نمونه برداری، شوری و دما در تابستان ۲۰۰۴ در فاصله ۲۵ ژوئن و ۱۸ آگوست ۲۰۰۴ در منطقه مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. اندازه‌گیری‌ها از جنوب دریای بوفورت آغاز شد، سپس کشتی به دهانه خلیج اماندسن منتقل گردید و پس از آن اندازه‌گیری‌ها در داخل خلیج اماندسن ادامه یافت و در روز ۲۲۲ اندازه‌گیری‌ها در شرق خلیج به پایان رسید. گستره تغییرات دما همانطور که در شکل نشان داده شده است بین  $(-1) - 9 \text{ } ^\circ\text{C}$  است و شوری نیز بین  $18 - 30 >$  متغیر است. همانطور که در شکل ۴ ج نشان داده شده است، در قسمت جنوبی دریای بوفورت و خلیج اماندسن دما به طور نسبی گرم‌تر از قسمت شمالی است.

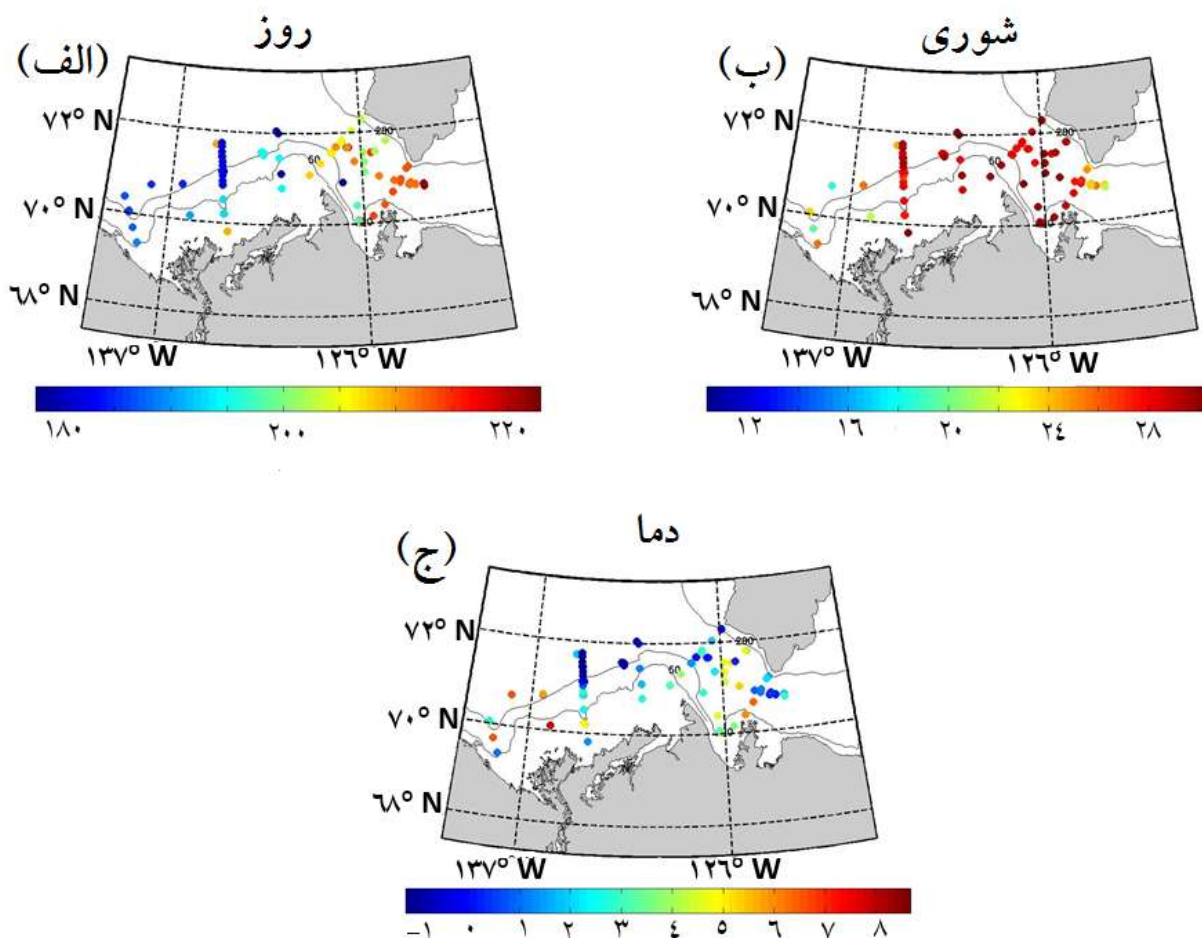
<sup>1</sup> Patchy



شکل ۲: مکان ایستگاه‌های اندازه‌گیری به عنوان تابعی از (الف) زمان اندازه‌گیری بر حسب روز سال؛ به عنوان مثال عدد ۲۷۵ به معنای ۲۷۵ امین روز سال میلادی است و معادل ۲ اکتبر و ۳۲۰ نیز معادل ۱۶ نوامبر می‌باشد. (ب) شوری در عمق ۵ متر و (ج) دما در عمق ۵ متر در پاییز ۲۰۰۳.



شکل ۳: شوری و دما در عمق ۵ متر در پاییز ۲۰۰۳. خطوط سیاه در جنوب و شمال عمق ۲۰۰ متر را نشان می‌دهد که به سمت ساحل اعماق کمتر از ۲۰۰ متر و دور از ساحل اعماق بیشتر از ۲۰۰ متر هستند.



شکل ۴: مکان ایستگاه‌های اندازه‌گیری به عنوان تابعی از (الف) زمان اندازه‌گیری بر حسب روز سال؛ ۱۸۰ معادل ۲۹ ژوئن و ۲۲۰ نیز معادل ۸ آگوست (ب) شوری در عمق ۵ متر و (ج) دما در عمق ۵ متر در تابستان ۲۰۰۴

در حالیکه در زمان‌های دیگر بین ۱۵ آوریل و ۱۵ ژوئیه جریان‌ها قابل چشم‌پوشی ( $> 2 \text{ m.s}^{-1}$ ) بود (Fortier و همکاران، ۲۰۰۸). در همان زمان چگالی پتانسیل ( $\theta\sigma$ ) در عمق ۳۰ متر به طور ناگهانی در شمال دماغه بترست افزایش یافت و چند روز پس از آن نیز در میان خلیج اماندن افزایش مشابه و البته کوچکتر مشاهده شد (Sévigny و همکاران، ۲۰۱۵). تمامی این مشاهدات شواهد رخداد فراجوشی را مهیا نمود. لازم به ذکر است که لایه گرم سطحی به ویژه در نیمه جنوبی خلیج اماندن و نزدیک به ساحل جنوبی دریای بوفورت تحت تاثیر همزمان گرم شدن فصلی و فراجوشی است. آب‌های نسبتاً سردتر نیمه شمالی خلیج اماندن و دور از ساحل دریای بوفورت ناشی از انتقال آب‌های سرد سطحی به دور از ساحل ناشی از پدیده فراجوشی است.

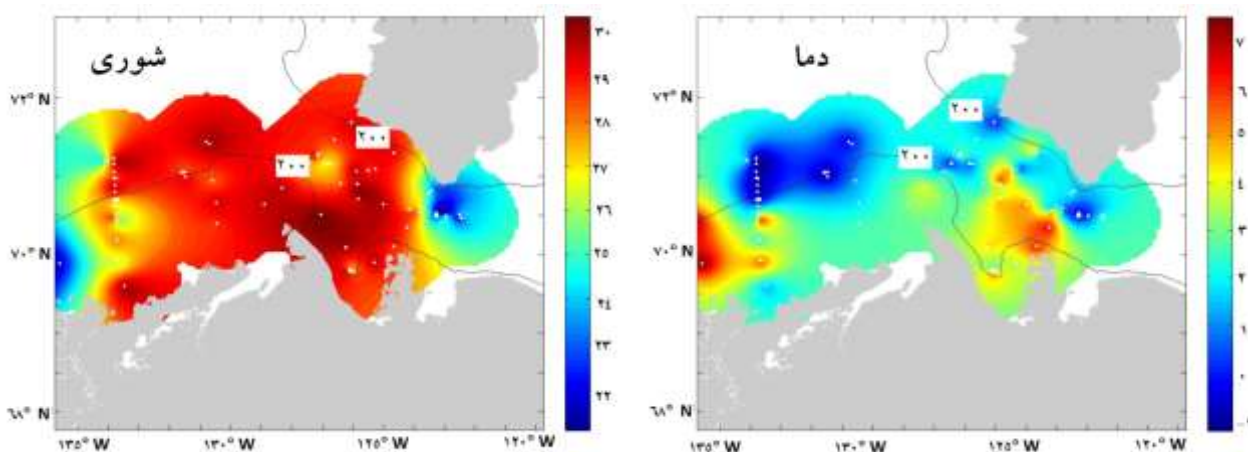
شکل ۷ نقشه نقطه‌ای تغییرات زمان اندازه‌گیری (بین ۲۸ سپتامبر و ۶ نوامبر)، شوری و دما در عمق ۵ متر در پاییز ۲۰۰۷ را

همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، شوری در سطح بیش از ۲۹ و در قسمت جنوبی خلیج اماندن بیشتر از ۳۰ می‌باشد که این شوری بیشتر از حد نرمال است چرا که انتظار داریم شوری نسبت به پاییز که یخ در حال تشکیل است کمتر باشد (مقایسه با شکل‌های ۲ و ۳). شوری و دمای بالا به خصوص در قسمت جنوبی خلیج اماندن ناشی از فراجوشی است که در منطقه اتفاق افتاده است. در اواخر ماه می و اوایل ژوئن ۲۰۰۴، بادهای شرقی (در حدود  $4/9 - 6/4 \text{ m.s}^{-1}$ ) به سرعت منطقه را با رانش یخ‌ها باز کردند و مقدمات تولید و گسترش فرآیند فراجوشی در شمال دماغه بترست (به شکل ۱ رجوع شود). مهیا شد (شکل ۶ Williams و Carmack، ۲۰۰۸). بین ۲۵ ماه می و ۶ ژوئن لایه سطحی ( $0 - 30 \text{ متر}$ ) با سرعت میانگین  $12/5 - 13/9 \text{ m.s}^{-1}$  حاکی بود از جریانی قوی که آب را در راستای ساحل به سمت شمال غرب انتقال می‌داد (Williams و Carmack، ۲۰۰۸).

بدون در نظر گرفتن زمان اندازه‌گیری قابل بررسی است. همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، شوری در قسمت جنوبی و شمالی منطقه مورد مطالعه به صورت محسوسی متفاوت است. به طوریکه نیمه جنوبی شوری بین ۳۱-۳۳/۵ و نیمه شمالی بین ۲۸-۳۱ متغیر است و گستره تغییرات شوری کل منطقه به شکل قابل توجهی بالاتر از پاییز ۲۰۰۴ (۲۱-۲۸) می‌باشد. علت این تفاوت قابل توجه، فراجوشی شدید بود که در اوایل سپتامبر چند هفته پیش از شروع اندازه‌گیری‌ها به علت وزش بادهای شرقی شدید اتفاق افتاد و خصوصیات فیزیکی، زیستی و شیمیایی کل منطقه را دچار تغییرات شدید کرد. به علت فراجوشی شدیدی که در منطقه اتفاق افتاد آب‌های نسبتاً شور اقیانوس آرام که در اعماق بیشتر از ۵۰ متر قرار دارند، را به سطح آورد.

نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۷.ب نشان داده شده است، شوری در کل منطقه اندازه‌گیری بسیار بالاست (۲۸-۳۳/۵) و در قسمت جنوبی خلیج اماندن به شکل قابل توجهی بالاتر از قسمت شمالی آن است. همچنین در دریای بوفورت انتظار می‌رود در نواحی نزدیک به ساحل به دلیل تاثیر روان‌آب رودخانه مکزیکی شوری کمتر از نواحی دور از ساحل باشد، در حالیکه در نواحی نزدیک ساحل شوری بیشتر از نواحی دور از ساحل است. نقشه نقطه‌ای دما مانند پاییز ۲۰۰۳ نشان‌دهنده تغییرات وصله‌ای دماست، به طوریکه دما در نقاط اندازه‌گیری مجاور تغییرات زیادی دارد.

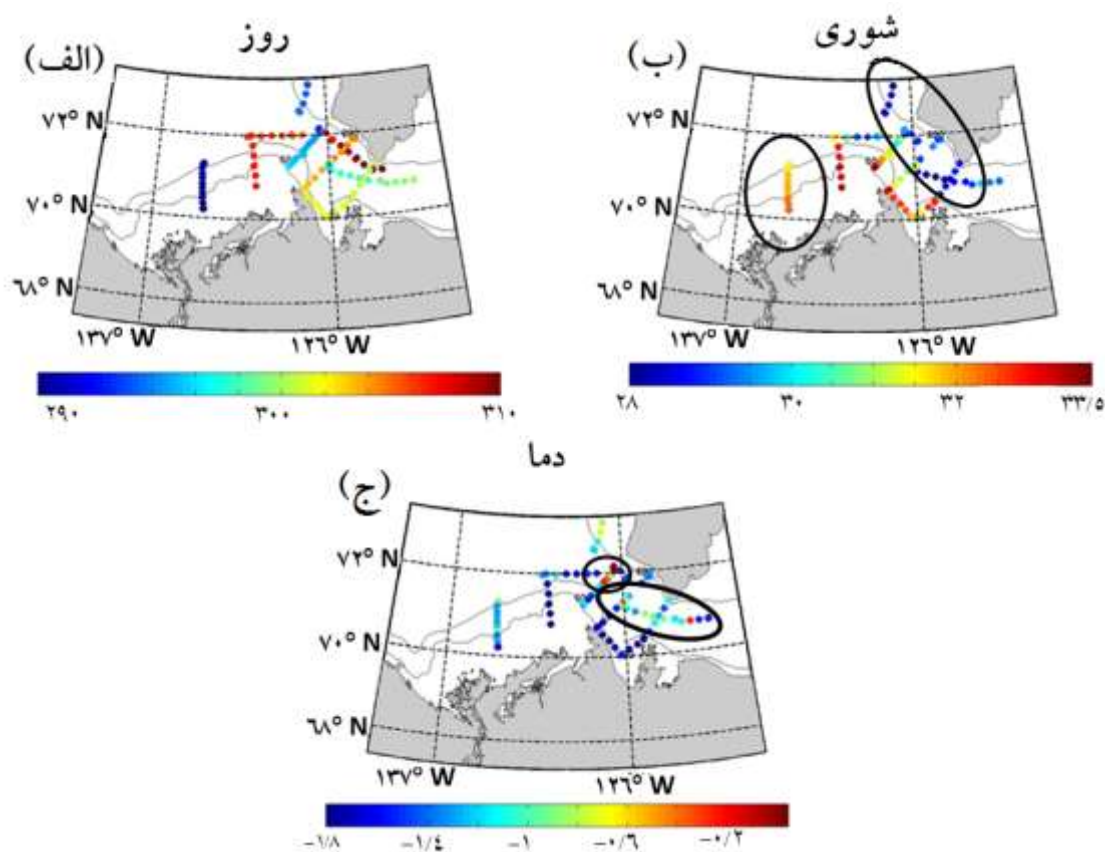
با استفاده از نقشه پهنه‌بندی دما و شوری در منطقه مورد مطالعه در پاییز ۲۰۰۷ (شکل ۸)، تغییرات مکانی دما و شوری



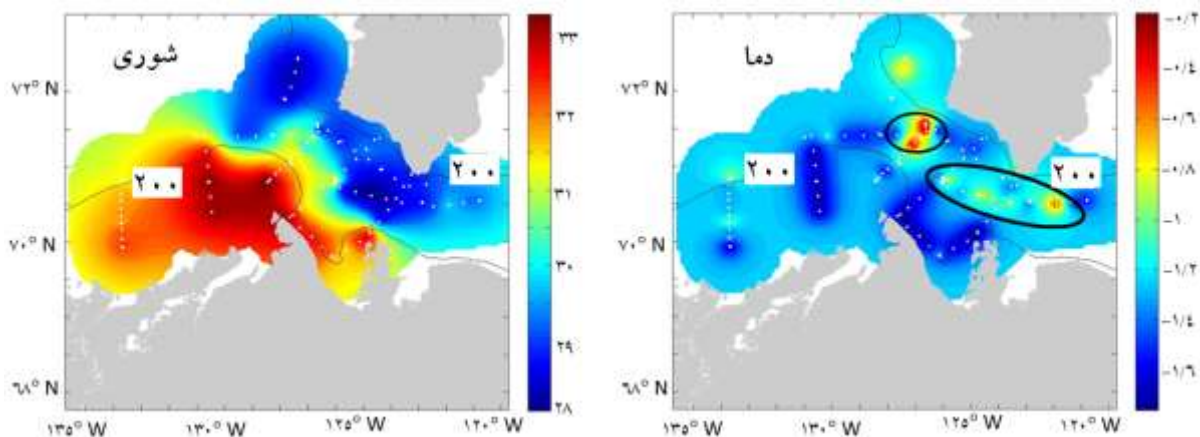
شکل ۵: شوری و دما در عمق ۵ متر در تابستان ۲۰۰۴. خطوط سیاه در جنوب و شمال عمق ۲۰۰ متر را نشان می‌دهد که به سمت ساحل اعماق کمتر از ۲۰۰ متر و دور از ساحل اعماق بیشتر از ۲۰۰ متر هستند.



شکل ۶: پوشش یخ در خلیج اماندن و جنوب دریای بوفورت از ماهواره Terra/MODIS (الف) ۲۰ ماه می و (ب) ۱۲ ماه ژوئن. قسمت تیره شکل نشان‌دهنده آب بدون پوشش یخ می‌باشد.



شکل ۷: مکان ایستگاه‌های اندازه‌گیری به عنوان تابعی از (الف) زمان اندازه‌گیری بر حسب روز سال؛ ۲۹۰ معادل ۱۷ اکتبر و ۳۱۰ معادل ۶ نوامبر (ب) شوری در عمق ۵ متر و (ج) دما در عمق ۵ متر در پاییز ۲۰۰۷



شکل ۸: شوری و دما در عمق ۵ متر در پاییز ۲۰۰۷. خطوط سیاه در جنوب و شمال عمق ۲۰۰ متر را نشان می‌دهد که به سمت ساحل، اعماق کمتر از ۲۰۰ متر و دور از ساحل، اعماق بیشتر از ۲۰۰ متر هستند.

گرینلند خارج می‌کند، حجم زیادی از یخ از قطب شمال خارج شد، به طوری که دومین کمینه وسعت یخ پس از سال ۲۰۰۵، در این سال مشاهده گردید. پس از پایان یافتن فراجوشی به علت

در همین سال به علت افزایش فشار سطح دریا در دریای بوفورت که به علت تشدید جریان رانش قطبی<sup>۱</sup> که یخ‌های اقیانوس منجمد شمالی را از سمت دریای برنت و دریای

<sup>۱</sup> Trans-polar Drift Stream (TDS)



پدیده فراجوشی در پاییز ۲۰۰۷ به حدی شدید بوده است که تغییر ماندگاری را در طول کل سال آینده رقم زده است به طوری که شوری سطحی حتی در تابستان سال بعد نیز بسیار بالا و در بعضی نقاط نزدیک به شوری آب‌های تابستانه آرام می‌باشد.

#### ۴. نتیجه‌گیری کلی

اقیانوس‌های منجمد شمالی و جنوبی به علت پوشش قابل توجه یخ نقش بسزایی در تغییر اقلیم و آب و هوای کره زمین دارند و خود نیز بیش از مناطق دیگر از تغییر اقلیم تاثیر پذیرفته‌اند. از همین رو مطالعه روی مناطق قطبی حایز اهمیت است. اقیانوس منجمد شمالی یک اقیانوس بسته است و توسط زمین‌ها و مجمع‌الجزایر بسیاری احاطه شده است. همچنین به علت پوشش بالای یخ در این مناطق، گذر با کشتی و اندازه‌گیری در این محل بسیار دشوار و در بسیاری از مواقع غیر ممکن بوده است. در سال‌های اخیر به واسطه گرمایش زمین و ذوب قابل توجه یخ‌های قطبی، مسیر گذر کشتی در تابستان هموار گردیده که بستر را برای اندازه‌گیری‌ها در اقیانوس منجمد شمالی مهیا کرده است. در جریان این مطالعه با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده در جریان دو پروژه تحقیقاتی CASES (۲۰۰۳-۲۰۰۴) و CFL (۲۰۰۷-۲۰۰۸)، با استفاده از تکنیک کریجینگ، نقشه‌های پهنه‌بندی دما و شوری در عمق ۵ متر در پاییز و تابستان تهیه و مطالعه سالانه و مکانی انجام گرفت.

نقشه‌های نقطه‌ای و پهنه‌بندی فصلی و سالانه دما و شوری در عمق ۵ متر نشان داد که در پاییز ۲۰۰۴ که فراجوشی اتفاق نیافتاده است، شوری در جنوب دریای بوفورت کمترین (بین ۲۱-۲۴)، در مناطق دور از ساحل تا حدود ۲۶ و در خلیج اماندسن بیشینه (تا حدود ۲۸) می‌رسد. دما در این فصل در جنوب دریای بوفورت در نزدیک ساحل بیشتر از مناطق دور از ساحل می‌باشد (۱- در مقابل ۱/۵-°C). شوری نسبی کمتر و دمای بیشتر در نزدیکی ساحل دریای بوفورت تحت تاثیر خروجی رودخانه مکزی است که حجم زیادی از آب شیرین و نسبتاً گرم را به داخل اقیانوس می‌ریزد. ساختار وصله‌ای دما به معنای تغییرات ناگهانی در نقاط مجاور، بیشتر در پاییز دیده می‌شود و می‌تواند تحت تاثیر پوشش یخ و همچنین زمان اندازه‌گیری باشد.

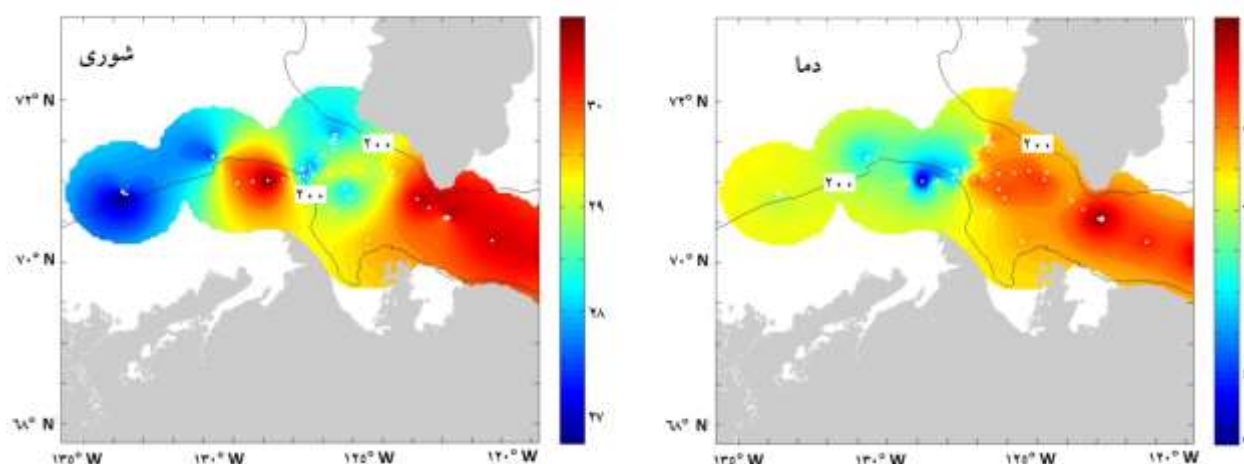
تماس مستقیم آب‌های نسبتاً گرم تابستانی اقیانوس آرام<sup>۱</sup> (°C) ۱- >) که با پدیده فراجوشی به سطح آورده شده‌اند، با هوایی که با شروع فصل پاییز به شدت در حال سرد شدن است، تماس پیدا کرده به سرعت دمای خود را از دست می‌دهند. به همین علت پس از گذشت چند هفته از پدیده فراجوشی اثر حرارتی آب‌های تابستانی آرام در منطقه کم‌رنگ می‌شود و با دور شدن قسمت شمالی خلیج اماندسن شاهد افزایش دما نسبت به قسمت جنوبی هستیم. با مقایسه نقشه پهنه‌بندی دما در پاییز ۲۰۰۴ و پاییز ۲۰۰۷، شاهد افزایش نسبی دمای آب سطحی در بیشتر مناطق در پاییز ۲۰۰۷ هستیم. این افزایش نسبی دما به علت به تعویق افتادن تشکیل یخ در این سال است که ناشی از فراجوشی و حضور آب‌های نسبتاً گرم تابستانی آرام در سطح می‌باشد.

توزیع مکانی دما و شوری سطحی در عمق ۵ متر در تابستان ۲۰۰۸ (۱۹ ژوئیه-۵ اگوست) که در شکل ۹ نمایش داده شده است، نشان می‌دهد که شوری در شرق خلیج اماندسن و شمال دماغه برتس بیشینه (>۳۰) و در دریای بوفورت کمینه (<۲۸) و در حدفاصل غرب خلیج اماندسن تا دهانه خلیج شوری در قسمت شمالی از میانه دهانه خلیج تا مجاورت ساش هاربور<sup>۲</sup> بین ۲۸-۲۹ متغیر است. در همین زمان دمای خلیج اماندسن (۷-۸/۵ °C) بیشتر از دریای بوفورت (۳-۶ °C) است.

در مقایسه با تابستان ۲۰۰۴ الگوی شوری و دما کاملاً متفاوت است و کمینه شوری سطحی در سال ۲۰۰۴ (۲۱) بسیار کمتر از کمینه شوری سطحی در سال ۲۰۰۸ (۲۷) می‌باشد و بیشینه شوری نیز در سال ۲۰۰۸ (حدود ۳۱) کمی بیشتر از سال ۲۰۰۴ (حدود ۳۰) است. دمای سطحی در تابستان ۲۰۰۸ (۳-۸/۵) به طور قابل توجهی بالاتر از تابستان ۲۰۰۴ (۱-۷/۵) است. علت این تفاوت پدیده فراجوشی شدید در پاییز سال گذشته و نیز کاهش شدید پوشش یخ به واسطه تغییرات جوی است. چرا که سطح آب‌های خالی از یخ قطبی به مدت طولانی‌تری در بهار و تابستان در معرض تابش خورشید قرار می‌گیرد و دمای سطح آب افزایش می‌یابد. همین امر خود عامل ذوب بیشتر یخ‌های یک ساله و چند ساله قطبی است و تولید یخ در فصل سرد سال بعد را نیز به تعویق می‌اندازد.

<sup>۱</sup> Pacific Summer Water (PSW)

<sup>۲</sup> Sachs Harbour



شکل ۹: شوری و دما در عمق ۵ متر در تابستان ۲۰۰۸. خطوط سیاه در جنوب و شمال عمق ۲۰۰ متر را نشان می‌دهد که به سمت ساحل اعماق کمتر از ۲۰۰ متر و دور از ساحل اعماق بیشتر از ۲۰۰ متر هستند.

سطحی به علت تبدلات و تغییرات سریع‌تر پس از مدتی پس از وقوع فراجوشی در تماس با هوای بسیار سرد کاهش می‌یابد. با این وجود در پاییز ۲۰۰۷ با اینکه اندازه‌گیری‌ها چند هفته پس از فراجوشی اتفاق افتاد، شدت این فراجوشی به حدی زیاد بود و آب گرم تابستانی آرام را به سطح آورد که دما در بسیاری از نقاط بین  $1/2$  - و  $0/2$  - مشاهده شد.

## ۵. قدردانی

بدین وسیله از پروفیسور Yves Gratton مجری بخش فیزیک پروژه CASES و CFL، برای در اختیار قرار دادن و مجوز استفاده از داده‌ها، مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیط زیست کانادا<sup>۴</sup> و کنسول علوم طبیعی و تحقیقات مهندسی کانادا<sup>۵</sup> برای تامین بودجه پروژه‌های تحقیقاتی CASES و CFL و همچنین مسئولین و خدمه کشتی تحقیقاتی CCGS Amundsen کمال تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

## منابع

Arabshahi, M. M.; Shavali, K. K., 2018. Consideration of Interpolation Methods on Precipitation and Temperature Data in Southern Caspian Sea Region

<sup>4</sup> National Centers for Environmental Prediction (NCEEP)  
<sup>5</sup> Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERCC)

جهت بادها در بهار ۲۰۰۴ و پاییز ۲۰۰۷ مطلوب برای ایجاد پدیده فراجوشی<sup>۱</sup> بودند، که شدت این پدیده در سال ۲۰۰۷ بسیار بالاتر و اثر آن ماندگارتر بود. در تابستان ۲۰۰۴ پدیده فراجوشی که در اواخر ماه می و اوایل ژوئن اتفاق افتاد، ساختار شوری منطقه را تحت تاثیر قرار داد و آب‌های تابستانی آرام را به سطح آورد. به طوریکه پس از فراجوشی حتی در نقاط نزدیک به ساحل در جنوب دریای بوفورت که تحت تاثیر خروجی رودخانه مکنزی است، شاهد شوری بالا (تا بیش از ۳۰) هستیم. تاثیر فراجوشی تا آنجا در منطقه بارز است که با اینکه در فصل تابستان که ذوب یخ در منطقه افزایش می‌یابد و انتظار شوری کمی را داریم، شوری در این فصل حتی نسبت به پاییز همان سال که فصل آغاز تولید یخ و به تبع افزایش شوری سطحی ست، بیشتر است (شوری در پاییز ۲۰۰۳ ۲۱-۲۸). در جریان سال بین‌المللی قطبی<sup>۲</sup> ۲۰۰۷-۲۰۰۸، اندازه‌گیری‌ها اثر به جا مانده از این فراجوشی را تا تابستان ۲۰۰۸ نشان دادند. این فراجوشی بسیار قوی ناشی از شرایط جوی غیرمعمول بود که تاثیر بسیاری بر پوشش یخ‌های چندساله قطبی<sup>۳</sup> گذاشت و حجم بالایی از یخ را به واسطه تشدید جریان رانش قطبی از منطقه خارج کرد. تاثیر فراجوشی به حدی بود که گستره تغییرات شوری در منطقه در پاییز ۲۰۰۷ بین ۲۸-۳۳/۵ بود، در حالیکه در همان فصل در سال ۲۰۰۴ گستره تغییرات شوری بین ۲۱-۲۸ مشاهده شد. دمای لایه

<sup>1</sup> Upwelling  
<sup>2</sup> International Polar Year (IPY)  
<sup>3</sup> Arctic multiyear sea ice cover

- Gratton, Y.; Bourgault, D.; Galbraith, P.; Prieur, L.; Tsarev, V.; Barette, J.; Salcedo- Castro, J.; Nahavandian, S.; Sharatunova, M.; Brouard, C.; Hamel, C.; Sévigny, C.; Rail, M. E.; Lago, V.; Guillot, P.; Bélanger, C.; Boisvert, D., 2012. Team 1: Physical Oceanography. In Barber, D., Tjaden, T., Leitch, D., Barber, L., and Chan, W., editors, *On the edge: from knowledge to action during the fourth international polar year circumpolar Flaw lead system study (2007-2008)*, pages 33–50. Winnipeg (MA). University of Manitoba, 242 p.
- Journel, A. G.; Huijbregts, C. J., 1978. *Mining Geostatistics*. Caldwell: Blackburn Press.
- Lanos, R., 2009. *Circulation régionale, masses d'eau, cycles d'évolution et transports entre la mer de Beaufort et le Golfe d'Amundsen*. Ph.D. thesis, Institut national de la recherche scientifique, Centre eau, terre et environnement, Québec (Qc). 245 p.
- Nahavandian, E. S., 2014. *Temporal and spatial evolution of the mixed layer in the southern Beaufort Sea and the Amundsen Gulf*. Ph.D. thesis, Institut national de la recherche scientifique, Centre eau, terre et environnement, Québec (Qc). 167 p.
- Perovich, D.K.; Richter-Menge, J.A.; Jones, K.F.; Light, B., 2008. Sunlight, water, and ice: Extreme Arctic sea ice melt during the summer of 2007. *Geophysical Research Letters*. 1;35(11).  
<https://doi.org/10.1029/2008GL034007>
- Perovich, D. K.; Elder, B., 2002. Estimates of ocean heat flux at SHEBA. *Geophysical Research Letters*. 29(9), 58-1.  
<https://doi.org/10.1029/2001GL014171>
- Sena Martins, M.; Serra, N.; Stammer, D., 2015. Spatial and temporal scales of sea surface salinity variability in the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 120(6), 4306-4323.
- (Summer and Winter). *Journal of Oceanography*, 9 (35):39-47 (In Persian).  
<https://doi.org/10.29252/JOC.2018.9.1289>
- Barber, D.G.; Asplin, M.G.; Gratton, Y.; Lukovich, J.V.; Galley, R.J.; Raddatz, R.L.; Leitch, D., 2010. The International Polar Year (IPY) Circumpolar Flaw Lead (CFL) system study: overview and the physical system. *Atmosphere-Ocean*, 48(4):225-43.  
<https://doi.org/10.3137/OC317.2010>
- Comiso, J. C.; Parkinson, C. L.; Gersten, R.; Stock, L., 2008. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophysical research letters*, 35(1).  
<https://doi.org/10.1029/2007GL031972>
- Carmack, E.C.; Macdonald, R.W., 2002. Oceanography of the Canadian Shelf of the Beaufort Sea: a setting for marine life. *Arctic*, 1:29-45.  
<https://doi.org/10.14430/arctic733>
- Carmack, E. C.; Macdonald, R. W., 2002. Oceanography of the Canadian Shelf of the Beaufort Sea: a setting for marine life. *Arctic*, 29-45.  
<https://doi.org/10.14430/arctic733>
- Fortier, L.; Barber, D.; Michaud, J., 2008. *On thin ice: a synthesis of the Canadian Arctic Shelf Exchange Study (CASES)*. Winnipeg, MB: Aboriginal Issue Press, University of Manitoba. 215.
- Garneau, M. È., Vincent, W. F., Alonso-Sáez, L., Gratton, Y.; Lovejoy, C., 2006. Prokaryotic community structure and heterotrophic production in a river-influenced coastal arctic ecosystem. *Aquatic Microbial Ecology*, 42(1), 27-40.  
<https://doi.org/10.3354/ame042027>
- Ghasemi, A. R.; Khalili, D., 2008. The effect of the North Sea-Caspian pattern (NCP) on winter temperatures in Iran. *Theoretical and applied climatology*, 92(1-2), 59-74.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-007-0309-1>

- analysis. *Global environmental change*. 14(2), 137-146.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2003.10.002>
- Tremblay, J.É.; Bélanger, S.; Barber, D.G.; Asplin, M.; Martin, J.; Darnis, G.; Fortier, L.; Gratton, Y.; Link, H.; Archambault, P.; Sallon, A., 2011. Climate forcing multiplies biological productivity in the coastal Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*. 28;38(18).  
<https://doi.org/10.1029/2011GL048825>
- Wang, J.; Zhang, J.; Watanabe, E.; Ikeda, M.; Mizobata, K.; Walsh, J. E.; Bai, X.; Wu, B., 2009. Is the Dipole Anomaly a major driver to record lows in Arctic summer sea ice extent? *Geophysical Research Letters*. 36(5):L05706.  
<https://doi.org/10.1029/2008GL036706>
- <https://doi.org/10.1002/2014JC010649>
- Sévigny, C.; Gratton, Y.; Galbraith, P.S., 2015. Frontal structures associated with coastal upwelling and ice edge subduction events in southern Beaufort Sea during the Canadian Arctic Shelf Exchange Study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1;120(4):2523-39.  
<https://doi.org/10.1002/2014JC010641>
- Stroeve, J.; Serreze, M. Drobot, S.; Gearheard, S.; Holland, M.; Maslanik, J.; Meier, W.; Scambos, T., 2008. Arctic sea ice extent plummets in 2007. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 8;89(2):13-4.  
<https://doi.org/10.1029/2008EO020001>
- Swart, R. J.; Raskin, P.; Robinson, J., 2004. The problem of the future: sustainability science and scenario