

## بررسی پایداری ایستایی و انتشار دوگانه در دریای عمان (خروجی تنگه ی هرمز)

محمد رضا خلیل آبادی<sup>۱</sup>، محمد اکبری نسب<sup>۲</sup>

[Rezakhililabadi@gmail.com](mailto:Rezakhililabadi@gmail.com)

۱- پژوهشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- استادیار دانشگاه مازندران

### چکیده

در این پژوهش در نقطه ای از دریای عمان به مختصات جغرافیایی عرض ۲۵ درجه ی شمالی و طول ۵۷ درجه ی شرقی و به عمق ۶۰۰ متر با استفاده از داده های اندازه گیری شده ی دما و شوری در فصول مختلف، پایداری ایستایی و انتشار دوگانه ی دما و شوری مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی پایداری ایستایی و همچنین رخداد یا عدم رخداد انتشار دوگانه ی دما و شوری و نیز نوع و میزان اهمیت آن در عمق ها و فصول مختلف، نیم رخ های دما، شوری، چگالی محلی، چگالی نهفته، بسامد شناوری و زاویه ی ترنر در فصول گرم و سرد سال محاسبه شده و مورد مقایسه قرار گرفته است.

### کلمات کلیدی :

ناپایداری ایستایی، انتشار دوگانه، انتشار همرفتی، دریای عمان

تاریخ دریافت مقاله : ۹۲/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۳/۸/۱۷

## ۱- مقدمه

انواع مختلفی از ناپایداری در اقیانوس رخ می دهد. در این پژوهش وضعیت پایداری ایستایی و انتشار دوگانه ی دما و شوری در منطقه ی مورد بررسی مد نظر است. پایداری ایستایی<sup>۱</sup> با تغییرات چگالی نسبت به عمق همراه است و انتشار دوگانه<sup>۲</sup> با گرادیان دما و شوری در اقیانوس همراه است. بررسی پایداری ایستایی و انتشار دوگانه به دلیل تأثیری که در برخی از فرایندهای اقیانوسی و تغییرات فراسنج های مختلف دارد دارای اهمیت است. به عنوان مثال بررسی پایداری ایستایی در مطالعه ی لایه بندی آب، شکل گیری امواج داخلی، نیز جابجایی نیم رخ های سرعت صوت، عمق قرار گرفتن مین های شناور و ... دارای اهمیت است.

فرایند انتشار دوگانه نیز علاوه بر تغییر لایه بندی، آب اقیانوس را آمیخته می کند و این رخداد قابل چشم پوشی نخواهد بود. مرفیلد<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۱۹۹۹ با استفاده از یک مدل عددی گردش آب اقیانوس که در آن انتشار دوگانه نیز در نظر گرفته شد، دریافتند که آمیختگی ناشی از انتشار دوگانه، توزیع محلی دما و شوری را تغییر می دهد هرچند که تأثیر اندکی بر گردش بزرگ مقیاس آب اقیانوس دارد [۶].

## ۱-۲- منطقه ی مورد مطالعه و داده های استفاده شده

منطقه ی انتخاب شده برای بررسی پایداری، نقطه ای از دریای عمان با طول جغرافیایی ۵۷ درجه ی شرقی و عرض جغرافیایی ۲۵ درجه ی شمالی است. عمق ستون آب در این نقطه ۶۰۰ متر است. یکی از دلایل انتخاب این نقطه برای بررسی پایداری، دسترسی به داده های آن در چندماه از سال است زیرا اکثر نقاطی که اطلاعات آن موجود بود فقط یک بار در سال در آن نقطه اندازه گیری میدانی انجام شده بود. در بعضی از نقاط دیگر نیز که اندازه گیری در دو نوبت انجام شده بود اندازه گیری ها در فاصله ی زمانی کوتاهی نسبت به یکدیگر انجام شده بود و امکان مقایسه ی پایداری در فصول سرد و گرم وجود نداشت. دلیل دیگر انتخاب این

نقطه، واقع شدن در محل خروجی آب خلیج فارس است که از لحاظ بررسی وقوع انتشار دوگانه و نوع آن در عمق های مختلف دارای اهمیت است.

## ۲- روش کار

در این قسمت نیم رخ های مربوط به فراسنج های دما و شوری، چگالی محلی و آنومالی چگالی نهفته، مربع بسامد شناوری و زاویه ی ترنر در دو فصل گرم و سرد سال مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند. مقادیر دما و شوری به طور مستقیم از اندازه گیری های میدانی به دست آمده اند ولی فراسنج های چگالی محلی، آنومالی چگالی نهفته، مربع بسامد شناوری و زاویه ی ترنر با استفاده از داده های دما و شوری و به وسیله ی برنامه ی رایانه ای در محیط Matlab محاسبه شده است. در محاسبه ی فراسنج های مذکور از الگوریتم ارائه شده توسط مک دوگال و همکارانش استفاده شده است [۴].

## ۲-۱- نیم رخ های دما و شوری

نیم رخ های دما و شوری اندازه گیری شده در اواخر بهار و اواخر پاییز در شکل های زیر نشان داده شده است. همانطور که شکل ۳ نشان می دهد، عمق لایه ی سطحی نسبت به عمق ستون آب بسیار کم است (حداکثر ۱۵ متر). مقایسه ی نیم رخ های دما در فصول گرم و سرد سال، نشان می دهد عمق لایه ی سطحی در فصل سرد تا حدودی بیشتر از فصل گرم است. دلیل کم بودن عمق در فصل گرم، این است که لایه ی سطحی آنقدر گرم می شود که چگالی اش به مراتب از چگالی آب های سرد عمق های پایین تر کمتر می شود و به دلیل پایداری ایستایی ستون آب به راحتی نمی تواند با آب های لایه های زیرین آمیخته شود.

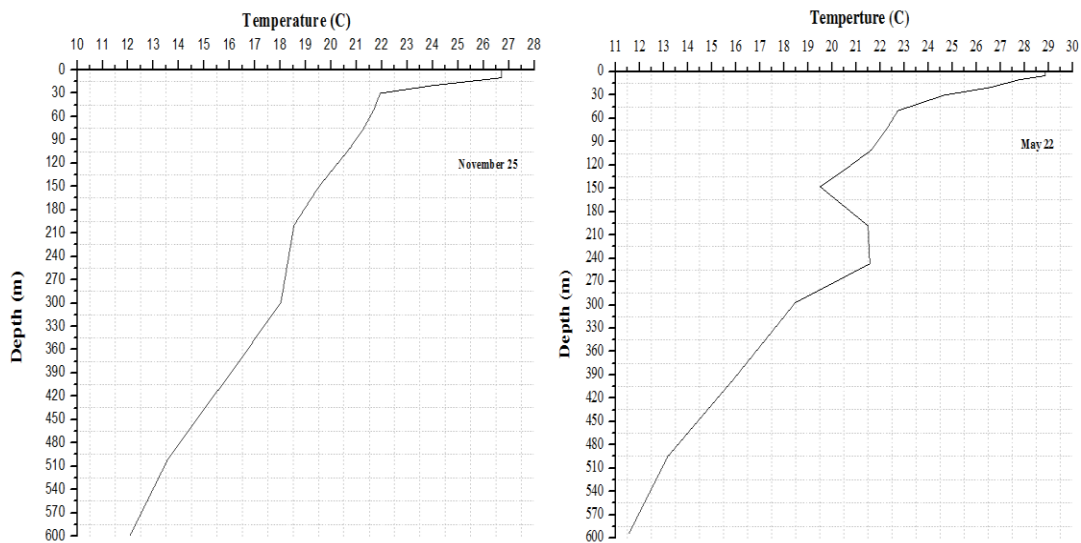
در فصل گرم تقریباً "بین عمق های ۱۵۰ متر تا ۲۵۰ متر وارونگی دما رخ می دهد. بین عمق های ۲۰۰ تا ۲۵۰ متر هرچند دما با عمق رو به افزایش است ولی اختلاف دمای بین ابتدا تا انتهای این لایه کمتر از ۰/۵ درجه ی سانتیگراد است و تقریباً یک لایه ی همدم را تشکیل می دهد. در فصل سرد نیز لایه ای به عمق تقریبی ۱۰۰ متر (تقریباً"

<sup>۱</sup>Static stability<sup>۲</sup>Double-diffusion<sup>۳</sup>Merryfield

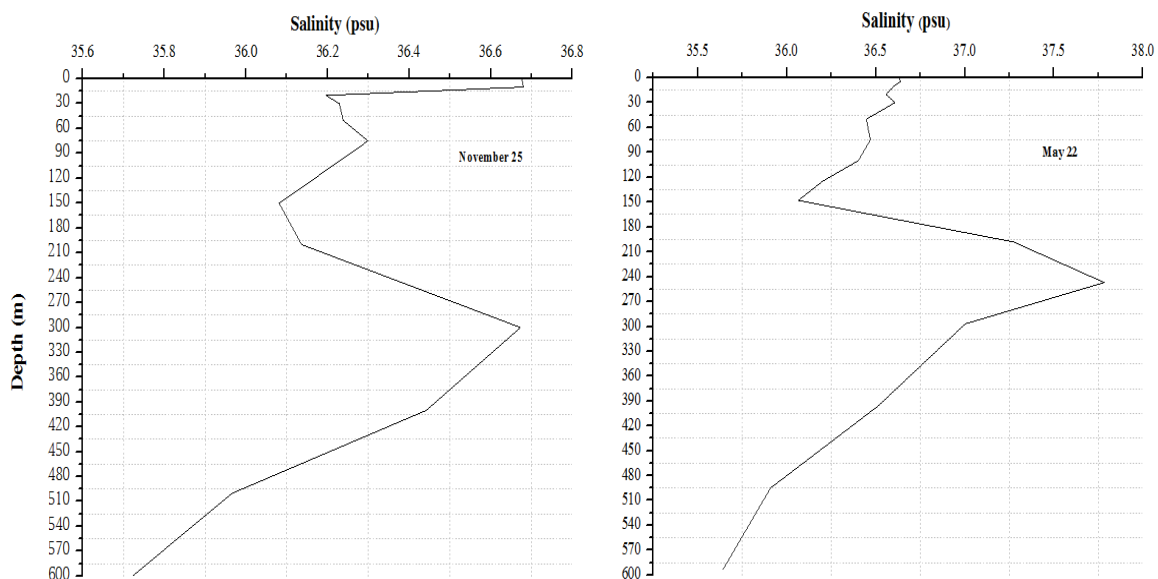
سرد تقریباً" بین عمق های ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر تشکیل شده است. همانطور که مشاهده می شود لایه ی وارونگی شوری در هر دو فصل بر لایه ی که در بالا در تفسیر نیم رخ های دما بحث شد منطبق است یعنی روند تغییرات دما در این لایه مانند تغییرات شوری آن با عمق های بالاتر و پایین تر متفاوت است. البته در عمق های بالاتر از ایان لایه نیز وارونگی شوری (افزایش شوری با عمق) در بعضی عمق ها مشاهده می شود ولی میانگین روند تغییرات در این عمق ها کاهش شوری با عمق را نشان می دهد.

بین عمقهای ۲۰۰ تا ۳۰۰) تشکیل شده است که اختلاف دمای بین ابتدا تا انتهای این لایه حدود ۰/۵ درجه ی سانتیگراد است.

نیم رخ تغییرات شوری با عمق در نیمه ی اول و دوم سال در شکل ۴ نشان داده شده است. به طور متوسط، شوری با عمق کاهش می یابد. ولی در هر دو فصل لایه ای به عمق تقریبی ۱۰۰ متر وجود دارد که وارونگی رخ می دهد یعنی در این لایه شوری با عمق افزایش می یابد. این لایه در فصل گرم، تقریباً" بین عمق های ۱۵۰ تا ۲۵۰ متر و در فصل



شکل ۳- نیم رخ تغییرات دما نسبت به عمق در اواخر بهار (شکل سمت راست) و اواخر پاییز (شکل سمت چپ)



شکل ۴- نیم رخ تغییرات شوری نسبت به عمق در اواخر بهار (شکل سمت راست) و اواخر پاییز (شکل سمت چپ)

زیاد مفید نیست. اگر بسته‌های آب را به سطح دریا بیاوریم و چگالی آنها را با هم مقایسه کنیم محاسبه چگالی نهفته، اثر فشار بر ضرایب انبساط گرمایی و شوری را حذف می‌کند. در این پژوهش آنومالی چگالی نهفته آب برای حالتی که بسته ی آب به سطح آورده شود محاسبه شده است و نیم رخ های آن برای دو فصل گرم و سرد سال رسم شده است (شکل ۶). همان طور که نیم رخ های تغییرات چگالی محلی و چگالی نهفته با عمق نشان می دهند بر خلاف نیم رخ های دما و شوری که دارای وارونگی ها و افت و خیزهایی هستند، در هر دو فصل در سراسر ستون آب، چگالی با عمق افزایش می یابد. افزایش چگالی با عمق، معرف پایداری ایستابی ستون آب است. همانطور که انتظار می رود، میزان این پایداری در ترموکلاین بیشتر است زیرا شیب تغییرات چگالی با عمق در این لایه تندتر است.

## ۲-۲- نیم رخ های چگالی و چگالی نهفته

تغییرات چگالی با عمق با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده<sup>۴</sup> محلی<sup>۴</sup> فشار، دما و رسانایی و با استفاده از معادله حالت آب دریا و به کمک نرم افزار Matlab و با استفاده از الگوریتم ارائه شده توسط مک دوگال و همکارانش محاسبه شده است [۵۴]. این محاسبه دارای دقتی در حدود ۲ ppm است. شکل ۵ نیم رخ های تغییرات محلی چگالی با عمق را نشان می دهد. برای بررسی تغییرات چگالی با عمق بدون در نظر گرفتن اثر تراکم پذیری، آنومالی چگال نهفته نیز با استفاده از الگوریتم ارائه شده توسط مک دوگال و همکارانش محاسبه شده است [۵۴]. چگالی نهفته<sup>۵</sup> ( $\rho_\theta$ )، چگالی یک بسته آب می باشد هنگامی که بطور بی‌دررو به سطح آورده شود و دما و شوری آن تغییر نکند.

$$\rho_\theta = \rho(S, \theta, 0) \quad (1)$$

اهمیت  $\rho_\theta$  به این دلیل است که یک مشخصه ترمودینامیکی پایسته می باشد. برای ساده‌سازی، اقیانوس شناسان تنها از دو رقم آخر استفاده می‌کنند که به آن آنومالی چگالی<sup>۶</sup> یا سیگما ( $\sigma(S, \theta, P)$ ) می‌گویند:

$$\sigma(S, \theta, P) = \rho(S, \theta, P) - 1000 \frac{kg}{m^3} \quad (2)$$

در صورتی که لایه سطحی اقیانوس مورد مطالعه قرار گیرد، با صرف‌نظر از تراکم پذیری، می‌توان کمیت جدید " $\sigma_\theta$ " را به صورت زیر تعریف کرد:

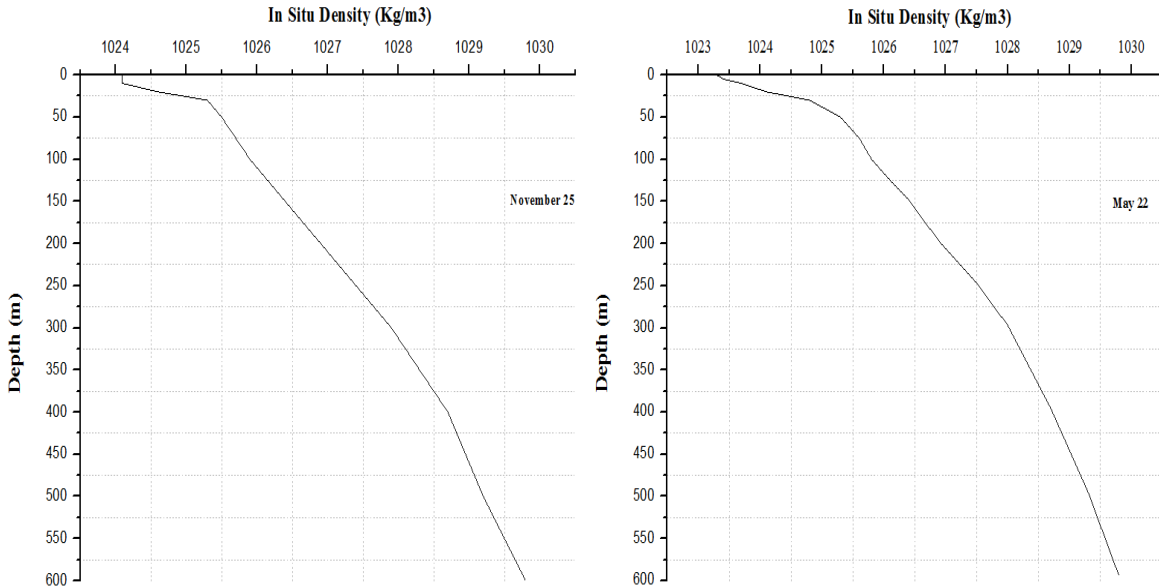
$$\sigma_\theta = \sigma(S, \theta, 0) = \rho_\theta - 1000 \frac{kg}{m^3} \quad (3)$$

این پارامتر، آنومالی چگالی نهفته مربوط به یک نمونه آب می باشد هنگامی که فشار کل وارد بر بسته آب به یک اتمسفر کاهش پیدا کرده باشد اما دما و شوری همان مقادیر محلی باشند. چگالی نهفته برای مقایسه چگالی آب در عمق های

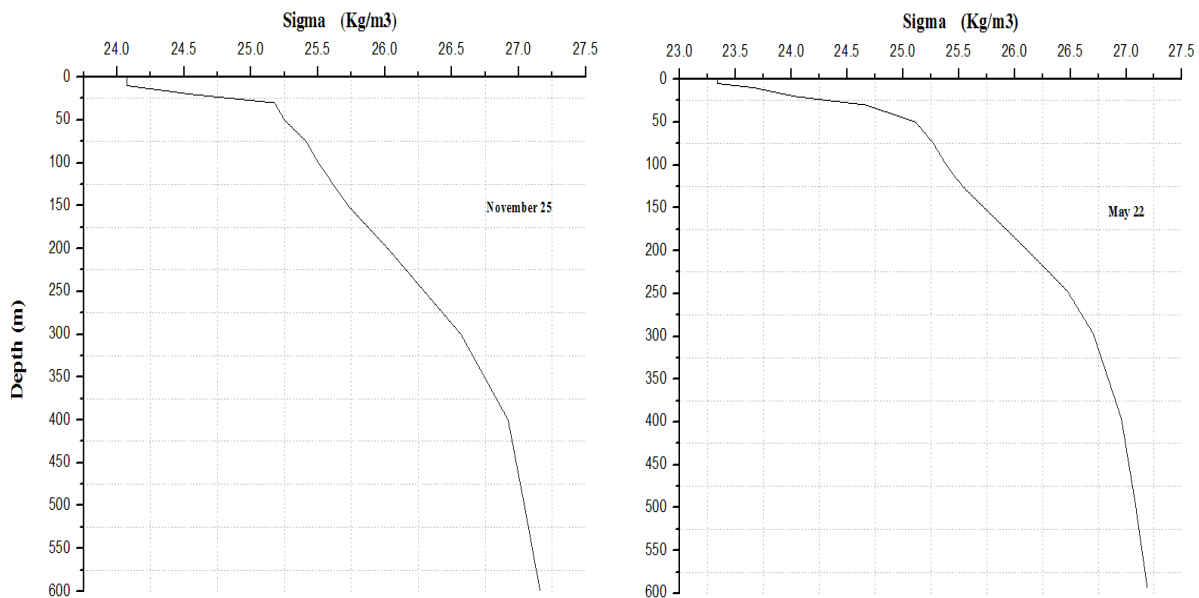
<sup>۴</sup> *In situ*

<sup>۵</sup> *Potential density*

<sup>۶</sup> *Density anomaly*



شکل ۵ - نیم رخ تغییرات چگالی نسبت به عمق در اواخر بهار (شکل سمت راست) و اواخر پاییز (شکل سمت چپ)



شکل ۶ - نیم رخ تغییرات آنومالی چگالی نهفته نسبت به عمق در اواخر بهار (شکل سمت راست) و اواخر پاییز (شکل سمت چپ)

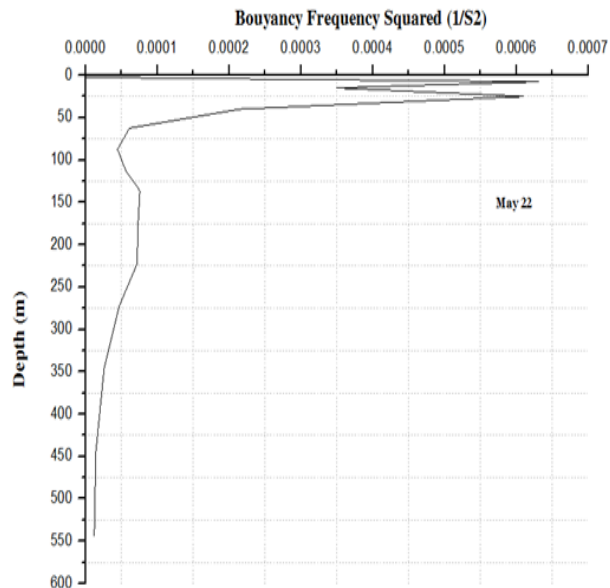
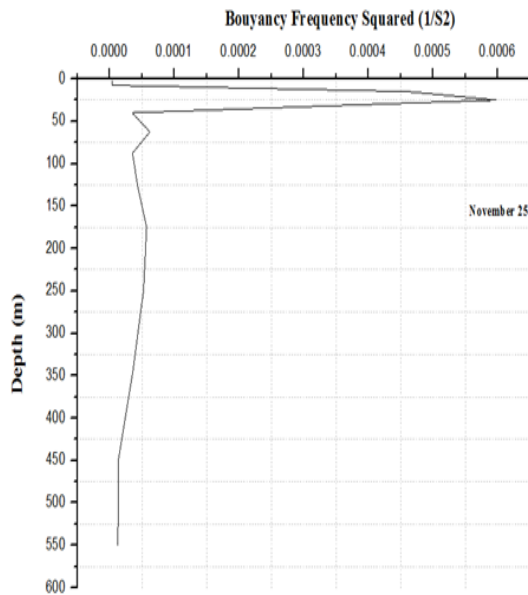
شناوری، بسامد پایداری نیز گفته می شود. برای این منظور مربع بسامد شناوری ( $N^2$ ) با استفاده از برنامه ی رایانه ای در محیط Matlab و با کمک الگوریتم ارائه شده توسط مک دوگال و همکارانش محاسبه شده است [۴، ۵]. شکل ۷، مربع بسامد پایداری را برای ستون آب مورد مطالعه در اواخر بهار و اواخر پاییز نشان می دهد. همانطور که مشاهده

### ۳-۲- بسامد شناوری

هر چند بررسی نیم رخ های چگالی، نشان داد که در سراسر عمق ستون آب و همچنین در هر دو فصل گرم و سرد، پایداری ایستابی وجود دارد ولی محاسبه ی بسامد شناوری که سنجه ی پایداری ستون آب است، میزان و اهمیت پایداری را در عمق های مختلف نشان می دهد. به بسامد

نشان می دهد ستون آب به سمت پایداری بی تفاوت نزدیک می شود.

می شود بیشترین پایداری در ترموکلاین رخ می دهد. در عمق های پایین، مقدار  $N^2$  به سمت صفر میل می کند که



شکل ۷- مربع فرکانس پایداری مشاهده شده در دریای عمان در اواخر بهار (شکل سمت راست) و اواخر پاییز (شکل سمت چپ).

رژیم انگشتی هنگامی رخ می دهد که  $90^\circ < Tu < 45^\circ$  باشد (که هرچه زاویه ی ترنر به  $90^\circ$  درجه نزدیک تر شود، این فرایند شدیدتر می شود). انتشار همرفتی هنگامی رخ می دهد که  $90^\circ - < Tu > 45^\circ -$  باشد (مقدار بیشینه ی این فرایند هنگامی رخ می دهد که زاویه ی ترنر تقریباً  $90^\circ -$  درجه باشد). در  $45^\circ < Tu < 45^\circ -$  انتشار همرفتی دوگانه رخ نمی دهد. زاویه ی ترنر بزرگتر از  $90^\circ$  درجه و یا کوچکتر از  $90^\circ -$  درجه نشان دهنده ی ناپایداری ایستایی ستون آب است که در این نقاط  $N^2 < 0$  خواهد بود.

مقادیر زاویه ی ترنر در عمق های مختلف با استفاده از یک برنامه ی رایانه ای در محیط Matlab و به کمک الگوریتم ارائه شده توسط مک دوگال و همکارانش محاسبه شده و نیم رخ های مربوط به آن در شکل ۹ رسم شده است [۵ و ۴]. با بررسی نیم رخ تغییرات زاویه ی ترنر با عمق در منطقه ی مورد بررسی (شکل ۹) مشخص می شود:

۴-۲ - انتشار دوگانه ی دما و شوری (نیم رخ های زاویه ی ترنر)

زاویه ی ترنر سنجه ی انتشار دوگانه ی دما و شوری در محیط است. این فرانسج به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Tu = \tan^{-1} \left( \frac{R_p + 1}{R_p - 1} \right) \quad (۴)$$

که  $R_p$  نسبت چگالی نامیده می شود و عبارت است از:

(۵)

$$R_p = \frac{\beta \frac{\partial S}{\partial z}}{\alpha \frac{\partial T}{\partial z}} \quad \text{یا} \quad R_p = \frac{\beta \Delta S}{\alpha \Delta T}$$

که  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب تغییر چگالی، به ترتیب در اثر دما و شوری می باشند.  $\frac{\partial S}{\partial z}$  و  $\frac{\partial T}{\partial z}$  نیز به ترتیب تغییرات دما و شوری نسبت به عمق هستند [۳، ۱].

شکل ۸ محدوده ی رژیم انگشتی، ناپایداری ایستایی و پایداری مضاعف را برای زوایای ترنر مختلف نشان می دهد.

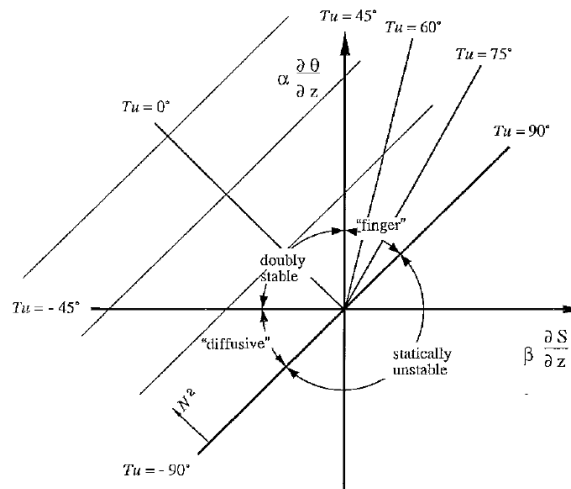
رخ داده است که این تطابق می تواند دلیلی بر ارتباط بین این دو پدیده باشد.

۳- در لایه ی عمیق، در هر دو فصل رژیم انگشتی نسبتاً قوی وجود دارد.

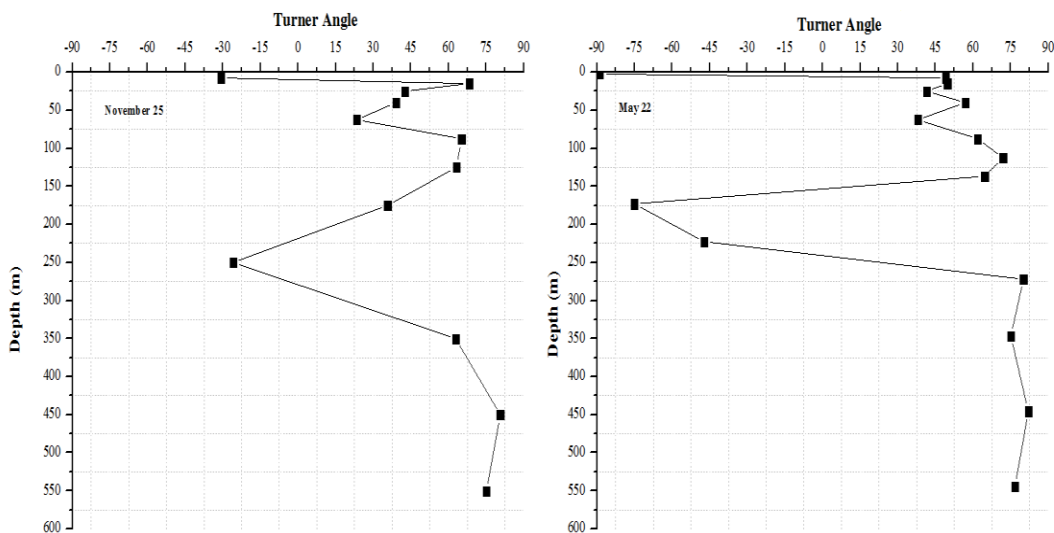
۴- در حدود ۱۵۰ متر اولیه ی ستون آب، رژیم انگشتی نسبتاً ضعیفی در بعضی از قسمتهای آن به طور نامنظم رخ می دهد.

۱- زاویه ترنر همیشه و در همه ی عمق ها بین ۹۰- تا ۹۰+ متغیر است بنابراین در هر دو فصل گرم و سرد سراسر ستون آب دارای پایداری ایستابی است.

۲- انتشار همرفتی در فصل گرم و در عمق تقریبی ۲۵۰- ۱۵۰ متر رخ می دهد. همانطور که در بررسی نیم رخ دما مشاهده شد، وارونگی دما نیز در این فصل در همین عمق



شکل ۸- محدوده ی رژیم انگشتی، انتشار همرفتی، ناپایداری ایستابی و پایداری مضاعف برای زوایای ترنر مختلف



شکل ۹- نیم رخ تغییرات زاویه ی ترنر نسبت به عمق در اواخر بهار (شکل سمت راست) و اواخر پاییز (شکل سمت چپ)

## ۳- نتایج

در این پژوهش برای بررسی پایداری ایستابی و همچنین رخداد یا عدم رخداد انتشار دوگانه ی دما و شوری و نوع و میزان اهمیت آن در هر عمق و فصل سال، نیم رخ های دما، شوری، چگالی محلی، چگالی نهفته، بسامد شناوری و زاویه ی ترنر در دو فصل گرم و سرد سال مورد بررسی قرار گرفته است که خلاصه ی نتایج آن را می توان به شرح زیر بیان نمود:

آب، چگالی محلی و چگالی نهفته با عمق افزایش می یابد. افزایش چگالی با عمق، معرف پایداری ایستابی ستون آب است. همانطور که انتظار می رود، میزان این پایداری در ترموکلاين بیشتر است زیرا شیب تغییرات چگالی با عمق در این لایه تندتر است.

بررسی نیم رخ تغییرات مربع بسامد شناوری ( $N^2$ ) با عمق نشان می دهد ستون آب دارای پایداری ایستابی است که بیشترین میزان پایداری در ترموکلاين رخ می دهد.

در عمق های پایین (لایه ی عمیق)، مقدار  $N^2$  به سمت صفر میل می کند که نشان می دهد ستون آب به سمت پایداری خنثی نزدیک می شود.

زاویه ترنر همیشه و در همه ی عمق ها بین  $-90^\circ$  تا  $+90^\circ$  متغیر است بنابراین در هر دو فصل گرم و سرد سراسر ستون آب دارای پایداری ایستابی است که نتایج به دست آمده در قسمت قبل را تایید می کند.

در حدود  $150$  متر اولیه ی ستون آب، رژیم انگشتی نسبتاً ضعیفی در بعضی از قسمتهای آن به طور نامنظم رخ می دهد.

انتشار همرفتی در فصل گرم و در عمق تقریبی  $150-250$  متر رخ می دهد. وارونگی دما نیز در این فصل در همین عمق رخ داده است که این تطابق می تواند دلیلی بر ارتباط بین این دو پدیده باشد.

در لایه ی عمیق، در هر دو فصل رژیم انگشتی نسبتاً قوی وجود دارد.

در فصل گرم تقریباً بین عمق های  $150$  متر تا  $250$  متر وارونگی دما رخ می دهد که میزان واونگی دما در  $50$  متر اولیه ی این لایه خیلی شدیدتر است.

در فصل گرم بین عمق های  $200$  تا  $250$  متر هرچند دما با عمق رو به افزایش است ولی اختلاف دمای بین ابتدا تا انتهای این لایه کمتر از  $0.5$  درجه ی سانتیگراد است و تقریباً یک لایه ی همدما را تشکیل می دهد. در فصل سرد نیز لایه ای به عمق تقریبی  $100$  متر (تقریباً بین عمقهای  $200$  تا  $300$ ) تشکیل شده است که اختلاف دمای بین ابتدا تا انتهای این لایه حدود  $0.5$  درجه ی سانتیگراد است.

در هر دو فصل گرم و سرد لایه ای به عمق تقریبی  $100$  متر وجود دارد که وارونگی شوری رخ می دهد یعنی در این لایه شوری با عمق افزایش می یابد. این لایه در فصل گرم، تقریباً بین عمق های  $150$  تا  $250$  متر (منطبق بر لایه ی وارونگی دما) و در فصل سرد تقریباً بین عمق های  $200$  تا  $300$  متر (منطبق بر لایه ی همدما) تشکیل شده است.

بر خلاف نیم رخ های دما و شوری که دارای وارونگی ها و افت و خیزهایی هستند، در هر دو فصل در سراسر ستون

## ۴- منابع و مراجع

- [1] Gill, A.E. "Atmosphere-Ocean Dynamics", New York, Academic Press. 1982.
- [2] Griffies, S. M. "Fundamentals of Ocean Climate Models", Princeton, NJ: Princeton University Press, 518 pp + xxxiv, 2004.

- [3] IOC, SCOR and IAPSO, "The international thermodynamic equation of seawater - Calculation and use of thermodynamic properties", Intergovernmental Oceanographic



Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English), 196 pp., 2010.

[4] McDougall, T.J., D.R. Jackett and F.J. Millero, "An algorithm for estimating Absolute Salinity in the GlobalOcean", Ocean Science. A preliminary version is available at Ocean Sci. Discuss., 6, 215-242., 2010.

[5] McDougall T.J., P.M. Barker, R. Feistel and D.R. Jackett, "A computationally

efficient 48-term expression for the density of seawater in terms of Conservative Temperature, and related properties of seawater", Ocean Science Discussions, 2011.

[6] Merryfield W.J., G. Holloway, and A.E. Gargett. "A global ocean model with doublediffusion mixing", Journal of Physical Oceanography 29 (6): 1124–1142., 1999

