

## مطالعه عددی مقایسه‌ای گردش آب در خلیج فارس با بهره‌گیری از طرح‌واره‌های تلاطمی مختلف

مستانه مهندسی نمین<sup>۱\*</sup> و عباسعلی علی اکبر بیدختی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آستارا، آستارا، ایران

<sup>۲</sup> استاد، مؤسسه ژنوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۷)

### چکیده

پیچیده بودن فرآیند اختلاط تلاطمی در خلیج فارس که یک دریای نیمه بسته است باعث می‌شودمی شود که این دریا گزینه مناسبی برای آزمون عملکرد طرح‌واره تلاطمی در شبیه‌سازی عددی گردش آب در آن باشد. محاسبه یا پیش‌بینی جریان آن‌ها در این محیط‌ها و گردش آب با در نظر گرفتن مسئله تلاطم از همه نظر مهم است به عنوان مثال از نظر پخش آلودگی‌ها، زیست‌محیطی، شیلاتی، کشتیرانی، و حتی نظامی در این مطالعه، مدل عددی سه بعدی COHERENS برای شبیه‌سازی گردش آب در خلیج فارس مورد استفاده قرار گرفته است. از دستگاه سیستم مختصات دکارتی برای راستای افقی و از دستگاه ازیستم مختصات سیگما با ۱۰ لایه برای راستای قائم استفاده شده است. خط ساحلی خلیج فارس و عمق آن بر اساس داده‌های عمق سنجی به دست آمده است. چهار طرح‌واره تلاطمی به جهت آزمون عملکرد آن‌ها به مدل اعمال شده است. طرح‌واره‌های اعمال شده شامل دو طرح‌واره بستار تلاطمی k-1 و k-ε و دو طرح‌واره جبری پاکانوسکی و فیلاندر (P-P) و طرح‌وار وابسته به جریان (جریان f-d) می‌باشد. در شبیه‌سازی گردش آب در خلیج فارس، پارامترها شوری و دما و الگوهای جریانات در سطح و کف، تکامل زمانی دماشیب، تکامل زمانی شوری و پارامترهای تلاطمی از جمله انرژی جنبشی تلاطمی و آهنگ و اتلاف انرژی و طول اختلاط و وشکسانی پیچکی و پخش پیچکی با اعمال این چهار طرح‌واره مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج بیانگر این است که حساسیت بیشتر عملکرد طرح‌واره‌ها در برآورد پارامترهای تلاطمی است و شبیه‌سازی الگوهای جریان و تاوایی در راستای افق، حساسیت کمتری در مقابل عملکرد طرح‌واره‌های مختلف تلاطمی نشان می‌دهند.

**واژه‌های کلیدی:** گردش آب در خلیج فارس، طرح‌واره‌های تلاطمی، مدل عددی COHERENS

## ۱ مقدمه

حالتی از شاره را که به طور دائم و پیوسته ناپایدار باشد، تلاطم می‌نامیم که اغلب در شاره‌هایی مانند اقیانوس و جو رخ می‌دهد و به کرات به عنوان آخرین مشکل بزرگ حل‌نشده فیزیک کلاسیک عنوان می‌شود و یک نقش محوری در جریان سیال در مهندسی و ژئوفیزیک ایفا می‌کند (رودی، ۱۳۸۸). در شاره‌هایی مانند اقیانوس و جو، در اثر رشد ناپایداری‌ها، جریان آرام به جریان تلاطمی تبدیل می‌شود (بیدختی و عظام، ۲۰۰۹). در چند دهه گذشته، بینش فوق‌العاده‌ای درباره فیزیک تلاطم از طریق مطالعات نظری و آزمایشگاهی، مشاهدات ژئوفیزیکی، بهبود روش‌های تجربی و مدل‌سازی عددی حاصل شده است. این مدل‌های عددی شامل طرح‌واره‌های مختلف تلاطمی می‌باشند (گالپرین و همکاران، ۱۹۹۸). مدل‌سازی و پیش‌بینی هیدرودینامیک محیط‌های دریایی، به شدت وابسته به این است که مدل مورد استفاده چقدر دقت دارد و بخشی از آن مدل‌ها معمولاً مربوط به تلاطم است. یکی از مشکلات اساسی که وجود دارد این است که مسئله تلاطم را چگونه در جریان‌های دریایی فرایابی کنیم. از آنجا که اختلاط قائم نقش مهمی در فرآیندهای اکوسیستم اقیانوسی ایفا می‌کند، انتخاب مدل تلاطمی مناسب در هر منطقه، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی در زمینه‌های مختلف از جمله هیدرودینامیکی، بیولوژیکی، آلودگی و رسوب را بهبود می‌بخشد.

در سال‌های اخیر مطالعات در زمینه ارزیابی عملکرد طرح‌واره‌های تلاطمی مختلف بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی هیدرودینامیک حوضه‌های آبی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در اینجا به چند مورد اشاره می‌کنیم.

لی و همکاران (۲۰۰۱)، مطالعه‌ای تحت عنوان مقایسه دو طرح‌واره اختلاف قائم در یک مدل گردش عمومی اقیانوس آرام انجام دادند. جریان‌ات سطحی اقیانوس آرام و میدان دما به وسیله یک مدل سه‌بعدی چرخش عمومی اقیانوس

OGCM و اعمال دو طرح‌واره مختلف تلاطمی از جمله طرح‌واره KPP و طرح‌واره PP شبیه‌سازی شده است. هر دو طرح‌واره، ساختارهای جریان و دمایی واقع‌گرایانه‌ای تولید کردند. هرچند طرح‌واره KPP دماشیب را واقعی‌تر شبیه‌سازی کرد. به عنوان یک نتیجه کلی عملکرد طرح‌واره KPP در این شبیه‌سازی از طرح‌واره PP بهتر است. اوبینو و همکاران (۲۰۰۲)، مطالعه‌ای تحت عنوان شبیه‌سازی گردش در دریای بوهائی و ساختار ترموهالینی با استفاده از مدل COHERENS انجام داده است. دو طرح‌واره تلاطمی  $k-l$  و  $k-\epsilon$  در مدل اعمال شده است. هر دو طرح‌واره پروفایل‌های انرژی جنبشی تلاطمی را به خوبی شبیه‌سازی می‌کنند. البته طرح‌واره  $k-l$  مقادیر بزرگتری از TKE را نسبت به طرح‌واره  $k-\epsilon$  شبیه‌سازی کرده است که به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است. ویجسکرا و همکاران (۲۰۰۳)، در مطالعه‌ای تحت عنوان مطالعه عددی اختلاط تلاطمی روی فلات قاره، عملکرد طرح‌واره‌های بستر تلاطمی را مقایسه کردند. آن‌ها آن‌ها از مدل عددی POM به جهت شبیه‌سازی گردش میان‌مقیاس و دینامیک اختلاط در جبهه فراچاهشی و فروچاهشی استفاده کردند و عملکرد ۳ طرح‌واره بستر تلاطمی ملور-یامادا و  $k-\epsilon$  و KPP را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج بیانگر اختلاف قابل توجه بین عملکرد طرح‌واره‌ها در تخمین مقیاس طول اختلاط است. همچنین اختلاف برای محاسبه ضرایب ادی و اسکوزیتی و ادی دیفیوژیویتی دیده می‌شود. دورسکی و همکاران (۲۰۰۴)، مطالعه‌ای تحت عنوان طرح‌واره‌های اختلاط قائم در اقیانوس‌های ساحلی انجام دادند. آن‌ها از مدل عددی ROMS با اعمال دو طرح‌واره بستر تلاطمی ملور-یامادا درجه ۲/۵ و یک نسخه بالا از kpp استفاده کردند. نتایج بیانگر آن است که طرح‌واره ملور-یامادا اختلاط عمیق‌تری را نسبت به طرح‌واره kpp نشان می‌دهد. ایلچجاک و همکاران (۲۰۰۸)، مطالعه‌ای تحت عنوان عملکرد بسترهای

پریستون انجام دادند. منطقه مورد مطالعه یک کانال خوری است همه نتایج نشان می‌دهند که الحاق طرح‌واره‌های بستر تلاطمی  $K-\omega$  و  $k-\epsilon$  در مدل POM رضایت‌بخش است. نتایج پیامدی از این واقعیت هستند که هر طرح‌واره تلاطمی، یک اهمیت نسبی متفاوت به فرآیندهای فیزیکی مختلف می‌دهد، مانند برش، شناوری و اتلاف انرژی. به عنوان مثال طرح‌واره  $k-\epsilon$  تمایل به تولید برش بیشتری نسبت به سایر طرح‌واره‌ها دارد و این احتمالاً باعث می‌شود که این طرح‌واره عمیق‌تر شدن لایه اختلاط را نسبت به بقیه طرح‌واره‌ها دست بالا تخمین بزند. مهندسی و همکاران (۲۰۱۷) مطالعه‌ای تحت عنوان برآورد پارامترهای تلاطم در یک دریای کم‌عمق با استفاده از شبیه‌سازی عددی، با حساسیت به فرایابی کردن اختلاط قائم انجام دادند. آن‌ها با اعمال چهار طرح‌واره تلاطمی وابسته به جریان  $(f-d)$ ، پاکانوسکی و فیلاندر  $(P-P)$ ، بستر تلاطمی  $(k-l)$  و بستر تلاطمی  $(k-\epsilon)$  در مدل عددی COHERENS برای برآورد پارامترهای تلاطمی در خلیج فارس، دریافتند که طرح‌واره‌های بستر تلاطمی در تخمین انرژی جنبشی تلاطمی و نرخ اتلاف انرژی و طول اختلاط نتایج بهتری را برآورد کردند.

هدف از انجام این پروژه بررسی عملکرد طرح‌واره‌های تلاطمی مختلف در مدل‌سازی عددی گردش آب در یک حوضه نیمه بسته مانند خلیج فارس می‌باشد. آب‌های کم‌عمق به شدت تحت تأثیر باد و جزرومد و فرارفت می‌باشد و بنابراین در این محیط‌ها تلاطم به وفور دیده می‌شود و گاهی احتمالاً تلاطم با امواج درونی دیده می‌شود. اینکه کدام‌یک از طرح‌واره‌های تلاطمی برای شبیه‌سازی جریان‌ات این منطقه مناسب می‌باشد و یا برای توزیع دما و شوری نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد مورد مطالعه قرار نگرفته است. نقش بسیار مهم خلیج فارس در مبادلات نفتی دنیا، اهمیت نظامی-راهبردی آن و وجود منابع غذایی غنی از جمله ۱۵۰ نوع ماهی متفاوت در آن، مطالعه در مورد

تلاطمی دو معادله‌ای در شبیه‌سازی سه‌بعدی خروجی دریای سرخ انجام دادند. آن‌ها از مدل عددی ROMS به جهت شبیه‌سازی استفاده کردند. با اعمال چهار طرح‌واره تلاطمی  $K-W$  و  $KPP$  و  $k-\epsilon$  و ملور-یامادا در مدل دریافتند که تفاوت بین عملکرد طرح‌واره‌ها در شبیه‌سازی پروفایل شوری کم بود. همه طرح‌واره‌های تلاطمی ساختار قائم این جریان خروجی را به خوبی نشان می‌دهند که شامل دو لایه با گرادیان چگالی و اختلاط کامل در لایه کف می‌باشد. لیو و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای تحت عنوان کاربرد طرح‌واره‌های بستر تلاطمی مختلف در مطالعه جریان و شوری در یک خور انجام دادند. منطقه مورد مطالعه خور رودخانه دانشیو است. آن‌ها از مدل سه‌بعدی هیدرودینامیکی ELCRIC با اعمال چهار طرح‌واره بستر تلاطمی  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  و  $k-kl$  و  $UB$  استفاده کردند. نتایج نشان داده است که هر چهار طرح‌واره نقش مشابهی را در شبیه‌سازی توزیع شوری ایفا می‌کنند. در شبیه‌سازی پخش گردابی طرح‌واره  $k-kl$  ضریب پخش گردابی را نسبت به بقیه طرح‌واره‌ها بزرگتر تخمین می‌زند. تومی و میرگ (۲۰۱۱)، مطالعه‌ای تحت عنوان ارزیابی عملکرد طرح‌واره‌های تلاطمی قائم در مدل‌سازی هیدرودینامیک دریای بالتیک انجام دادند. آن‌ها از مدل سه‌بعدی COHERENS برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک حوضه استفاده کردند. با اعمال چهار طرح‌واره تلاطمی، از جمله ۲ طرح‌واره جبری  $M-A$ ،  $P-P$  و ۲ طرح‌واره بستر تلاطمی  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  در مدل دریافتند که شوری توسط همه طرح‌واره‌ها طرح‌واره با دقت پیش‌بینی شده است. به جز طرح‌واره‌های  $M-A$  و  $k-l$ ، بقیه طرح‌واره‌ها دمای سطحی را بسیار دست پایین تخمین زده‌اند و به عنوان یک نتیجه اصلی دریافتند که طرح‌واره‌های بستر تلاطمی نسبت به طرح‌واره‌های جبری در توافق بهتری با مشاهدات هستند. سوزا و همکاران (۲۰۱۳) مطالعه‌ای تحت عنوان مقایسه طرح‌واره‌های بستر تلاطمی جدید در مدل اقیانوسی

قابل دسترسی است و می‌تواند به عنوان ابزاری برای درک بهتر فرآیندهای فیزیکی در نواحی ساحلی و فلات قاره‌ها مورد توجه قرار گیرد. مزایای مهم این مدل عبارت‌اند از: شفافیت و انعطاف‌پذیری آن به دلیل امکان‌پذیری انتخاب فرآیندهای متنوع، طرح‌واره‌های مختلف یا انواع متفاوت نیروها برای یک کاربرد خاص. از مشخصه‌های مهم مدل قدرت فراسنجی مناسب برای آهنگ اتلاف انرژی تلاطم و قابلیت شبیه‌سازی پارامترهای مختلف، با منظور کردن طرح‌واره‌های مختلف تلاطمی است. معادلات مدل COHERENS، هم در مختصات کارتزین  $(x_1, x_2, x_3)$  و هم در مختصات کروی  $(\lambda, \theta, x_3)$  فرمول‌بندی شده‌اند. در دستگاه مختصات کارتزین از تقریب صفحه  $f$  استفاده می‌شود. به دلیل اینکه اختلاط تلاطمی نقش مهمی در گردش در ستون آب در آب‌های کم‌عمق ایفا می‌کند، شبیه‌سازی بهتر لایه‌های آمیخته سطح و بستر با استفاده از یک سیستم مختصات قائم که توپوگرافی را نیز در بردارد، امکان‌پذیر است که سیستم مختصات سیگما نامیده می‌شود. در این مختصات هم‌سطح و هم‌کف به مختصات جدید تغییر شکل یافته که این تغییر به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} (\bar{t}, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) &= (t, x_1, x_2, Lf(\sigma)) \\ \sigma &= \frac{x_3 + h}{\xi + h} \end{aligned}$$

بخش هیدرودینامیک مدل فرمول‌های پایه زیر را مورد استفاده قرار می‌دهد: معادله تکانه، معادله هیدرواستاتیک، معادله پیوستگی، معادلات فرارفت گرما و شوری.

مؤلفه  $x$  معادله تکانه عبارت است از:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x_1} + v \frac{\partial u}{\partial x_2} + w \frac{\partial u}{\partial x_3} - fv &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( V_T \frac{\partial u}{\partial x_3} \right) \\ &+ \frac{\partial \tau_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x_2} \end{aligned}$$

خصوصیات مختلف این منطقه و پارامترهای فیزیکی آن را بسیار حائز اهمیت می‌سازد.

## ۲ مواد و روش‌ها

مدل‌های عددی اقیانوسی بسیاری وجود دارد که قابلیت بررسی هیدرودینامیک حوضه‌های آبی، گردش آب‌ها و پیش‌بینی جریانات اقیانوسی می‌پردازند مانند مدل‌های POM، HYCOM، COHERENS و GOTM. از بین این مدل‌ها، مدل عددی COHERENS که یک مدل سه‌بعدی است مدلی مناسب برای مطالعه دریا‌های کم‌عمق می‌باشد. همچنین این مدل‌ها طرح‌واره‌های مختلف تلاطمی را نیز شامل می‌شوند. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق حوضه نیمه بسته خلیج فارس می‌باشد که در محدوده مشخصات جغرافیایی  $23^\circ$  الی  $48^\circ$  طول جغرافیایی شرقی و  $30^\circ$  الی  $57^\circ$  عرض جغرافیایی شمالی قرار دارد و با وسعتی در حدود  $237473 \text{ km}^2$  پس از خلیج مکزیکو و خلیج هودسن، سومین خلیج بزرگ جهان محسوب می‌شود. از نظر آب و هوایی خلیج فارس، شرایط خشک و نیمه استوایی دارد و به عنوان گرمترین پهنه آبی دنیا شناخته شده است. عمق متوسط آن بین ۲۵ تا ۳۵ متر است که در دهانه تنگه هرمز به بیش از ۱۰۰ متر می‌رسد به همین دلیل تمام خلیج فارس تشکیل یک فلات قاره را می‌دهد (بیدختی و عظام، ۲۰۰۹)؛ بنابراین انتخاب مدل COHERENS برای مطالعه این منطقه کم‌عمق مناسب است.

## ۱-۲ توصیف مدل

کوهیرنس (COHERENS) یک مدل هیدرودینامیکی سه‌بعدی است که دارای کاربردهای متنوعی در سواحل و فلات قاره و دریا‌های کم‌عمق می‌باشد. برنامه مدل توسط یک گروه چند ملیتی اروپایی در دوره زمانی ۱۹۹۰-۱۹۹۸ توسعه داده شده است و هم‌اکنون برای گروه‌های علمی

y معادله تکانه عبارت است از:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x_1} + v \frac{\partial v}{\partial x_2} + w \frac{\partial v}{\partial x_3} + fu \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( v_T \frac{\partial v}{\partial x_3} \right) \\ + \frac{\partial \tau_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{22}}{\partial x_2} \end{aligned}$$

معادله برنولی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho g$$

(ب) معادله پیوستگی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial u}{\partial x_1} + \frac{\partial v}{\partial x_2} + \frac{\partial w}{\partial x_3} = 0$$

(ج) معادلات دما و شوری به ترتیب عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x_1} + v \frac{\partial T}{\partial x_2} + w \frac{\partial T}{\partial x_3} \\ = \frac{1}{\rho_0 c_p} \frac{\partial I}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \lambda_T \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \lambda_H \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \lambda_H \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) \\ \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x_1} + v \frac{\partial S}{\partial x_2} + w \frac{\partial S}{\partial x_3} \\ = \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \lambda_T \frac{\partial S}{\partial x_3} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \lambda_H \frac{\partial S}{\partial x_1} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \lambda_H \frac{\partial S}{\partial x_2} \right) \end{aligned}$$

رسوب و بیولوژیکی برنامه نیز تأثیر دارد. انتخاب طرح‌واره اغلب دشوار است، چون بستگی به نوع فرآیندهای فیزیکی مخصوص منطقه شبیه‌سازی شده (جزرومدها، جبهه رودها)، قدرت تشکیل قائم مدل و مقدار زمان پردازشگر دارد. به همین دلیل تعداد زیادی از طرح‌واره‌های تلاطم با هم ترکیب شده‌اند. طرح‌واره به کارگرفته شده در برنامه فرآیندهای فیزیکی زیر را نشان دهد: تلاطم تولید شده توسط اصطکاک جزرومدی در لایه‌های زیرین، تلاطم ایجاد شده در لایه سطحی به وسیله باد، افزایش تنش کف مربوط به برهم‌کنش امواج و جریانات در کف دریا، گردش‌های فصلی گرما و سرما که شامل تکامل دامشیب می‌شود و تنش باد که اختلاط را در جبهه رودخانه‌ها ایجاد می‌کند. این طرح‌واره‌ها دو دسته هستند: دسته اول طرح‌واره‌های جبری و دسته دوم طرح‌واره‌های بستار تلاطمی است. طرح‌واره‌های جبری از روابط تجربی برای فرایابی تلاطم استفاده می‌کنند. طرح‌واره‌های بستار تلاطمی از معادله انرژی جنبشی تلاطمی به صورت زیر استفاده می‌کنند:

$$(T + Ah + Av - D_h)k - \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \left( \frac{v_T}{\partial k} + v_b \right) \frac{1}{J} \frac{\partial k}{\partial x_3} \right) = v_T M^2 - \lambda_T N^2 - \varepsilon$$

که  $k$  انرژی جنبشی تلاطمی،  $N^2$  و  $M^2$  مجذور فرکانس های شناوری و برش و  $\varepsilon$  بیانگر نرخ اتلاف انرژی تلاطم است.

در اینجا به معرفی چند طرح‌واره تلاطمی که در مدل عددی COHERENS استفاده می‌شود می‌پردازیم:

### ۱-۲-۲ طرح‌واره جبری پاکانوسکی و فیلاندر (PP)

طرح‌واره پاکانوسکی و فیلاندر (۱۹۸۱) یک طرح‌واره تلاطمی جبری وابسته به عدد ریچاردسون است. برای تعیین ضرایب پخش پیچکی برای تکانه و کمیت عددی از روابط زیر استفاده می‌کند:

### ۲-۲ معرفی طرح‌واره تلاطم در مدل عددی COHERENS

یکی از مسائل پیچیده در مدل اقیانوس‌شناسی، تعیین و فرانسجی فرآیندهای تبدالی قائم است. در مدل حاضر، این فرآیندها با ضرایب ادی  $\lambda_T$  و  $v_T$  نشان داده می‌شوند. فرانسجی ساده برای تلاطم به نحوی است که این ضرایب ثابت باشند. در غیر این صورت مقدار این دو پارامتر با طرح‌واره تلاطم تعیین می‌شوند. انتخاب طرح‌واره تلاطم مناسب نه تنها روی فیزیک مسئله بلکه تا زمانی که همان ضرایب پخش قائم  $\lambda_T$  برای گرما و شوری، رسوب و غلظت مواد آلوده کننده استفاده شود، روی بخش‌های

نزدیک لایه‌های سطحی و کف رو به کاهش است. به دنبال کار (دیویس، ۱۹۹۰) پروفایل خطی مقطع به صورت زیر اتخاذ شده است:

$$\phi(\sigma) = \frac{(1-r_1)\delta + r}{\delta_1} \quad \text{for } \sigma \leq \delta_1$$

$$\phi(\sigma) = \frac{1}{D} \quad \text{for } \delta_1 \leq \sigma \leq 1 - \delta_2$$

$$\phi(\sigma) = \frac{r_2 \frac{(r_2-1)(1-\delta)}{\delta_2}}{D} \quad \text{for } 1 - \delta_2 \leq \sigma \leq 1$$

که  $\sigma$  به وسیله رابطه مقابل تعیین می‌شود:

$$\sigma = \frac{x_3 + h}{\zeta + h} = \frac{x_3 + h}{H}$$

$$D = 1 + \frac{1}{2}\delta_1(r_1 - 1) + \frac{1}{2}\delta_2(r_2 - 1)$$

یک فاکتور میانگین است طوری که انتگرال روی عمق  $\phi(\sigma)$  برابر یک شود.  $\delta_1$  و  $\delta_2$  بخش کوچکی از عمق لایه‌های کف و سطح هستند و  $r_1$  و  $r_2$  نسبت مقدار  $\phi$  در کف و سطح به مقدار داخلی هستند. مقدار پیش فرض پارامترها به صورت زیر است:

$$\delta_1 = \delta_2 = 0 \text{ و } r_1 = r_2 = 1$$

که یک پروفایل قائم یکنواخت می‌دهد. برای دریافت جزئیات بیشتر درباره انتخاب این پارامترها به مقاله دیویس (۱۹۹۳) مراجعه کنید.

بر طبق نتایج گلوریسو و دیویس (۱۹۹۵) تلاطم تولید شده توسط باد، وابسته به سرعت اصطکاکی سطح است که فرم ساده زیر را دارا است:

$$v_\omega = \lambda_* u_{*s}$$

$\lambda_*$  پارامتر تنظیم‌پذیر ثابت و  $u_{*s}$  سرعت اصطکاکی سطح که با رابطه زیر داده می‌شود:

$$p \cdot u_{*s} = \tau_s^2 = (\tau_{s1}^2 + \tau_{s2}^2)^2$$

برای فاکتور شار  $\alpha$  سه فرمول وجود دارد:

$$\alpha = K_1 (\bar{U}^2 - \bar{V}^2)^{1/2}$$

$$\alpha = K_2 (\bar{U}^2 - \bar{V}^2) / (H^2 \omega_1)$$

$$\alpha = K_1 (\bar{U}^2 - \bar{V}^2)^{1/2} \Delta_h / H$$

$$v_T = v_{\omega p} f_p^{np}(Ri) + v_{bp}$$

$$\lambda_T = v_T f_p(Ri) + \lambda_{bp}$$

$$f_p(Ri) = (1 + \alpha_p Ri)^{-1}$$

عدد ریچاردسون برحسب نسبت مجذور فرکانس شناوری به مجذور فرکانس برش (Shear) تعریف می‌شود:

$$Ri = N^2 / M^3$$

$$N^2 = \frac{\vartheta}{J} \left( \beta_T \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) - \beta_s \frac{\partial s}{\partial x_2}$$

$$M^2 = \frac{1}{J^2} \left( \left( \frac{\partial u}{\partial x_3} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x_3} \right)^2 \right)$$

$\beta_T$  و  $\beta_s$  ضرایب بسط شوری و گرما است. این طرح‌واره ابتدا برای کاربرد در مدل‌های اقیانوس جهانی ایجاد شده است (سمتر و چروین، ۱۹۸۸)؛ و این برتری را نسبت به طرح‌واره‌های بستار تلاطمی دارد که به رزولوشن قائم حساسیت کمتری دارد. در غیاب لایه‌بندی، ضرایب مقدار یکنواختی می‌گیرند می‌گیرند (پاکانوسکی و فیلاندر، ۱۹۸۱).

## ۲-۲-۲ طرح‌واره جبری وابسته به جریان

در دریا‌های فلات قاره‌ای و ساحلی، جزرومد منبعی بارز و چشمگیر برای تلاطم است. مشاهدات در دریای ایرلند مشخص می‌کند که ادی ویسکوزیتی متناسب با اندازه جریان جزرومدی است (بودن و همکاران، ۱۹۵۹). فرایابی مناسب برای جریان جزرومدی به صورت زیر می‌تواند باشد:

$$v_T = (\alpha(x_1 \cdot x_2 \cdot t)\phi(\sigma) + v_\omega) f_m(Ri) + v_b$$

$$\lambda_T = (\alpha(x_1 \cdot x_2 \cdot t)\phi(\sigma) + v_\omega) \vartheta_m(Ri) + \lambda_b$$

جملات آخر معادلات بالا پیش‌زمینه و شکسانی و پخش پیچکی هستند.

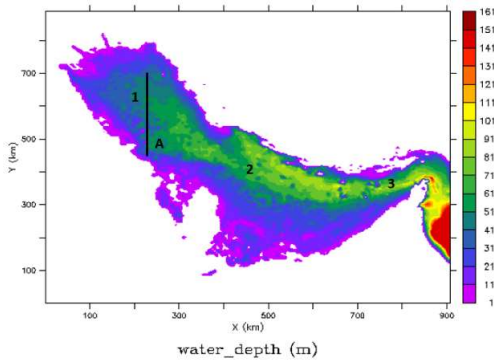
میدان جریان با فاکتور  $\alpha$  (مستقل از عمق) نشان داده شده است. در غیاب لایه‌بندی، تغییرات قائم تلاطم را پروفایل  $\phi(\sigma)$  تعیین می‌کند. که مقدار آن برای تلاطم در

که:

$$\alpha_N = \frac{k^2}{\varepsilon^2} N^2$$

### ۳ آماده‌سازی مدل

عمق سنجی منطقه خلیج فارس بر حسب داده‌های ETOPO-2 در یک شبکه ۲ دقیقه‌ای با تفکیک افقی ۳۲۰۰ متر در جهت x و ۳۷۰۴ متر در جهت y انجام شد. کمترین عمق بکار گرفته شده در مدل ۳ متر و بیشترین عمق آب ۱۶۰ متر در تنگه هرمز می‌باشد. (شکل ۱).



شکل ۱. عمق سنجی منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های ۱، ۲، ۳ و برش A.

از سیستم مختصات دکارتی برای راستای افقی و از مختصات سیگما با ۱۰ لایه برای راستای قائم استفاده شده است. داده‌های هواشناسی، دما، شوری، نیروهای میانگین ماهیانه جوی اقلیمی (مؤلفه‌های سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی، پوشش ابر، بارش، ...) برای یک دوره ۵۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۶۰) از داده‌های NOAA میانگین‌گیری شده و در مدل استفاده شده است.

طرح‌واره فرارفتی استفاده شده طرح‌واره TVD با شرط محدودیت superbee است. ضریب اصطکاک کف  $0.005 \frac{m}{s}$  و طول زبری بستر  $0.15 m$  انتخاب شده است. مؤلفه‌های اصلی جزر و مد شامل  $S_2$  و  $M_2$  و  $K_1$  و  $O_1$ . همچنین مدل دارای یک مرز باز در تنگه هرمز است که داده‌های درجه حرارت و شوری این مرزها از مقاله السی و همکاران (۱۹۹۹) استخراج و در مدل اعمال شده است.

$\Delta_b$  ضخامت لایه مرزی کف به عنوان تابعی از سرعت اصطکاکی کف اندازه‌گیری می‌شود:

$$\Delta_b = \min\left(\frac{C_v u_{*b}}{\omega^1}, H\right)$$

$$p. u_{*b} = \tau_b^{\frac{1}{2}} = (\tau_{b1}^2 + \tau_{b2}^2)^{\frac{1}{2}}$$

۳-۲-۲ طرح‌واره بستار تلاطمی ملور یامادا (κ-۱) ضرایب ادی در طرح‌واره بستار تلاطمی κ-۱ که توسط ملور و یامادا (۱۹۸۲) ارائه شده است به صورت زیر هستند:

$$U_T = S_m k^{\frac{1}{2}} l + v_b$$

$$\lambda_T = S_h k^{\frac{1}{2}} l + \lambda_b$$

در اینجا  $S_m$  و  $S_h$  توابع پایداری هستند.

$$S_m = \frac{0.556 + 2.18 h}{1 + 20.4 G_h + 53.1 G_h^2} \quad S_h = \frac{0.699}{1 + 17.3 G_h}$$

که:

$$G_h = \frac{l^2}{k} N^2$$

$v_b$  و  $\lambda_b$  ضرایب وشکسانی و پخش پیش‌زمینه را تعیین می‌کنند.

نرخ اتلاف بر اساس رابطه زیر فراسنجی می‌شود:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 k^{3/2} / l$$

فراسنجی طول اختلاط بر اساس معادلات زیر است که برگرفته از مطالعات (بلاکادر، ۱۹۶۲) است.

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_\alpha}$$

### ۳-۲-۲ طرح‌واره بستار تلاطمی κ-ε

ضرایب ادی در طرح‌واره بستار تلاطمی κ-ε که توسط لیتون و همکاران (۱۹۹۶) ارائه شده است به صورت زیر هستند:

$$U_T = \frac{S_u k^2}{\varepsilon} + v_b$$

$$\lambda_T = \frac{S_b k^2}{\varepsilon} + \lambda_b$$

مقدار ε و l با حل معادله انرژی جنبشی تلاطم محاسبه می‌شود.

$S_u$  و  $S_b$  از روابط زیر به دست می‌آید:

$$S_u = \frac{0.108 + 0.0229 \alpha_N}{1 + 0.471 \alpha_N + 0.0275 \alpha_N^2} \quad S_b = \frac{0.177}{1 + 0.403 \alpha_N}$$

جدول ۱. چهار اجرا با اعمال چهار طرح‌واره تلاطمی.

شماره اجرا	نوع طرح‌واره تلاطمی	نام طرح‌واره تلاطمی	شماره معادلات جابجایی	نوع توابع پایداری	فرمول‌بندی طول اختلاط	شرط محدودیت
a	جبری	flow-dependent	-	-	-	-
b	جبری	Pacanowski-Philander	-	-	-	-
c	بستار تلاطمی	k-l	یک معادله‌ای	Richardson number formulation	"Blackadar" formulation	فعال
d	بستار تلاطمی	k-ε	یک معادله‌ای	Richardson number formulation	"Blackadar" formulation	فعال

را با استفاده از چهار طرح‌واره تلاطمی نشان می‌دهد. آب‌های با شوری کم از ناحیه دریای عمان و از طریق تنگه هرمز وارد خلیج فارس می‌شوند و این زبانه آب کم شور تا شمال غربی خلیج فارس کشیده می‌شود. شوری سطحی به دو بخش مجزای شمالی و جنوبی تقسیم می‌شود. بخش شمالی که حاوی زبانه جریان آب کم شور است که از عمان وارد خلیج فارس شده است با شوری  $36/7$  psu می‌باشد و بخش جنوبی حاوی آب‌های شور خلیج فارس است که در آن مناطق شوری برابر  $38/7$  psu می‌باشد. نفوذ این زبانه کم شور به خلیج فارس باعث تشکیل یک ناپایداری کژ فشار در نوار فراساحلی شمالی خلیج می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که شوری توسط طرح‌واره‌های p-p و k-ε دست پایین تخمین زده می‌شود. ساختار جبهه بین دو آب ورودی و خروجی دارای پیچک‌های میان مقیاس است. در مقایسه عملکرد طرح‌واره‌ها، طرح‌واره f-d، نفوذ زبانه کم شور به خلیج فارس را از همه طرح‌واره‌ها بهتر شبیه‌سازی می‌کند و طول این زبانه را نسبت به بقیه بلندتر تخمین می‌زند. در بین بستارهای تلاطمی، طرح‌واره k-l نسبت به طرح‌واره k-ε عملکرد بهتری دارد. شکل ۵ الگوهای جریان بر روی زمینه

### ۳-۱ تنظیم مدل با طرح‌واره‌های تلاطمی مختلف

از بین طرح‌واره‌های تلاطمی موجود در مدل عددی COHERENS، چهار طرح‌واره تلاطمی انتخاب شده است. این چهار طرح‌واره عبارت‌اند از: طرح‌واره جبری وابسته به جریان (f-d)، طرح‌واره جبری پاکانوسکی و فیلاندر، P- (P)، طرح‌واره بستار تلاطمی ملور- یامادا (k-l) و طرح‌واره بستار تلاطمی  $k - \epsilon$ . این چهار طرح‌واره طی چهار اجرا به صورت جداگانه به مدل اعمال شده است و بعد از اعمال هر طرح‌واره، مدل برای مدت ۱۰ سال اجرا شده است تا به پایداری برسد. شرح اجراها در جدول ۱ آورده شده است.

### ۴ نتایج

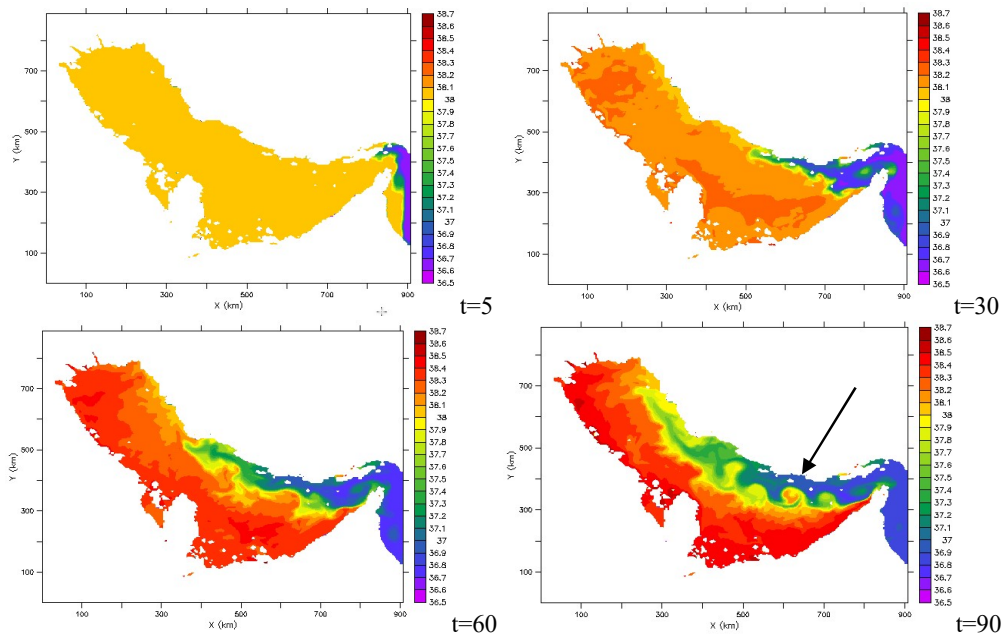
بعد از تهیه و تنظیم هندسه منطقه مورد مطالعه، انتخاب وضوح افقی و قائم مناسب و اعمال شرایط اولیه و مرزی و اجرای مدل، با استفاده از نرم‌افزار FERRET، اطلاعات خروجی مربوط به توزیع دما، شوری، جریانات و تاوایی را به صورت شکل‌های گرافیکی تبدیل کرده‌ایم که نتایج به صورت زیر است:

#### ۴-۱ مقایسه عملکرد طرح‌واره‌های تلاطمی در

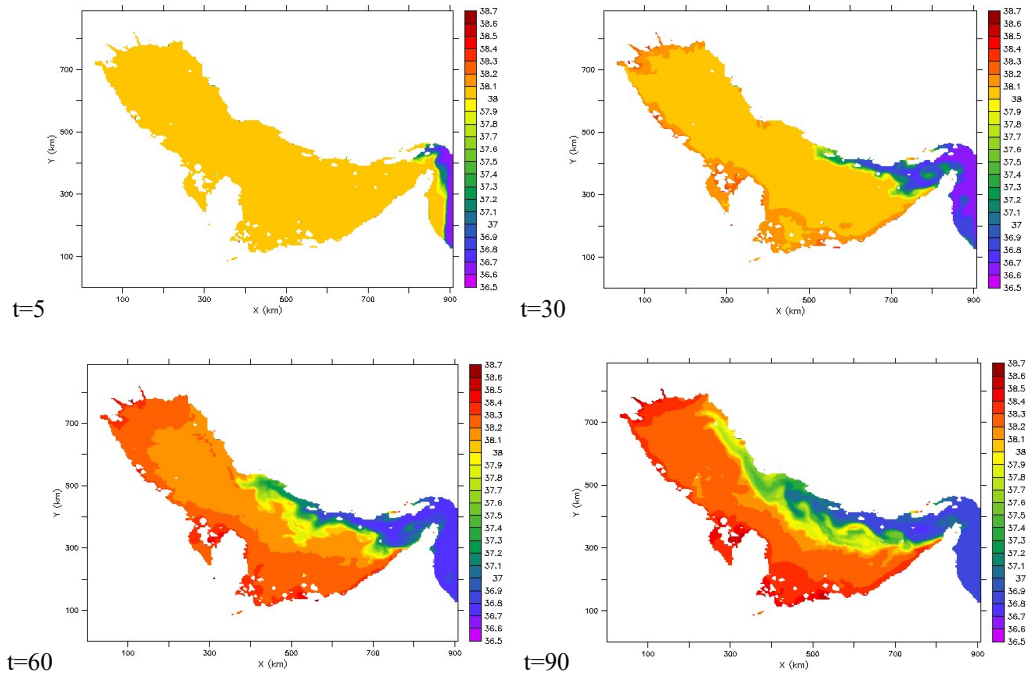
#### برآورد پارامتر شوری و جریانات حوضه

شکل ۲ تا ۵ توزیع شوری سطحی در خلیج فارس در تابستان

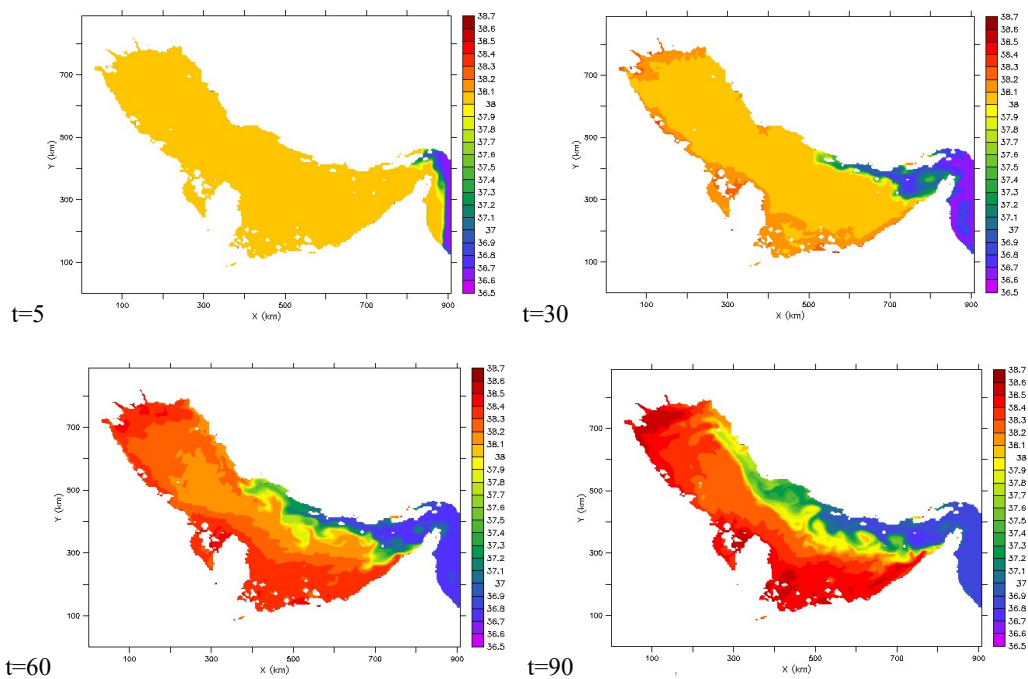




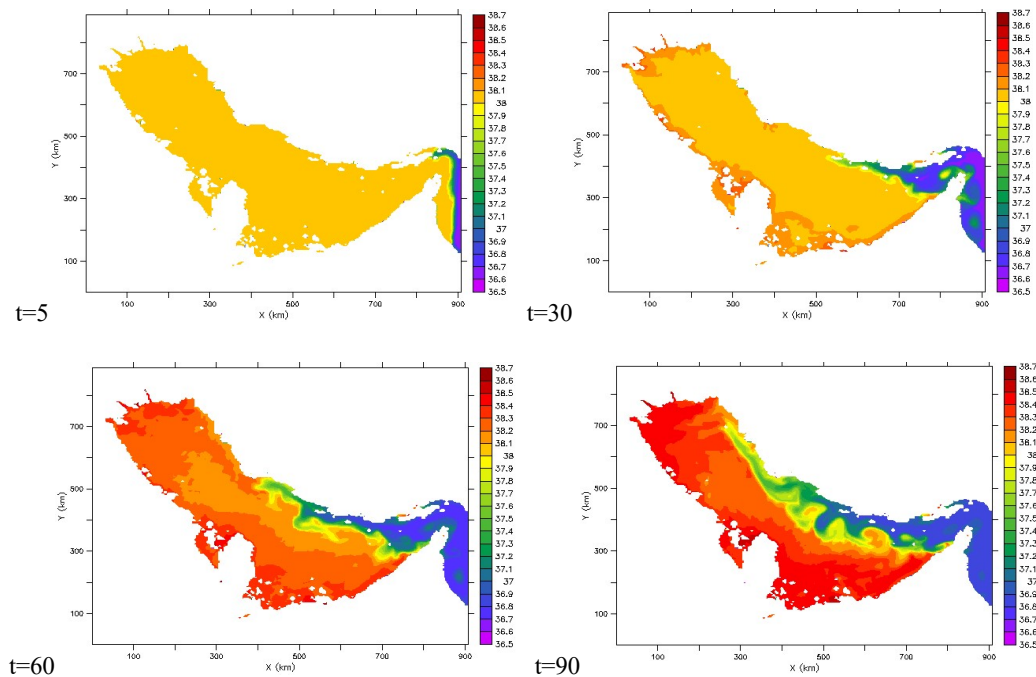
شکل ۲. توزیع شوری سطحی در خلیج فارس با استفاده از طرح‌واره تلاطمی f-d در زمان‌های ۱، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز.



شکل ۳. توزیع شوری سطحی در خلیج فارس با استفاده از طرح‌واره تلاطمی p-p در زمان‌های ۱، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز.



شکل ۳. توزیع شوری سطحی در خلیج فارس با استفاده از طرح‌واره بستار تلاطمی  $k-l$  در زمان‌های ۱، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز.



شکل ۴. توزیع شوری سطحی در خلیج فارس با استفاده از طرح‌واره بستار تلاطمی  $k-\epsilon$  در زمان‌های ۱، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز.

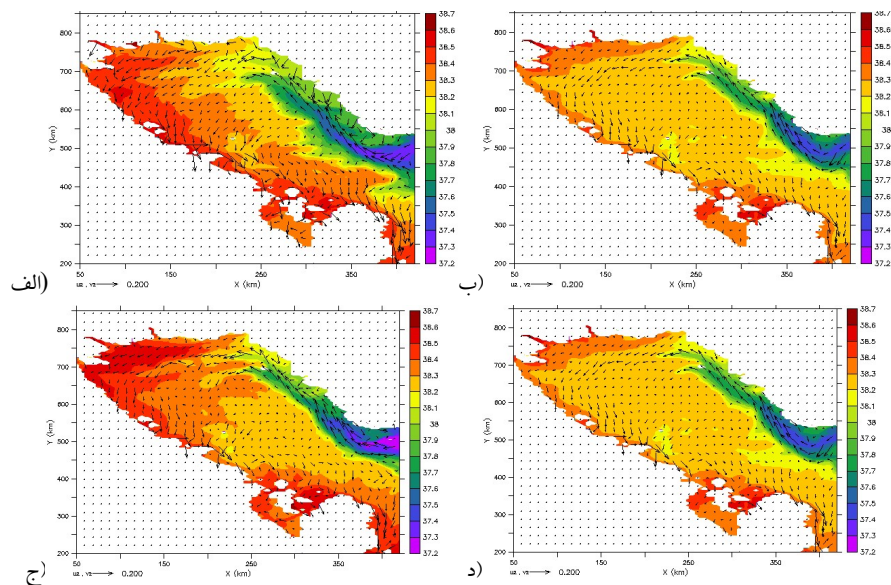
می‌کند. در بین بستارهای تلاطمی طرح‌واره k-l نسبت به طرح‌واره k-e عملکرد بهتری دارد.

شکل ۷ الگوهای جریان در ناحیه میانی خلیج فارس در فصل تابستان در لایه سطحی را نشان می‌دهد. در بخش شمالی جبهه آب‌های ورودی همراه با پیچک‌هایی هستند. در بخش جنوبی بردارهای جریان آب‌های خلیج فارس هستند که به سمت شرق و به طرف تنگه هرمز حرکت می‌کنند. در مقایسه بین عملکرد طرح‌واره f-d سرعت جریان را بیشتر تخمین می‌زند و بهتر از بقیه طرح‌واره‌ها قادر به شبیه‌سازی پیچک‌ها می‌باشد. هر چند طرح‌واره‌های بستار تلاطمی هم الگوهای جریان را خوب نشان می‌دهند. طرح‌واره pp در این شبیه‌سازی ضعیف‌تر عمل می‌کند.

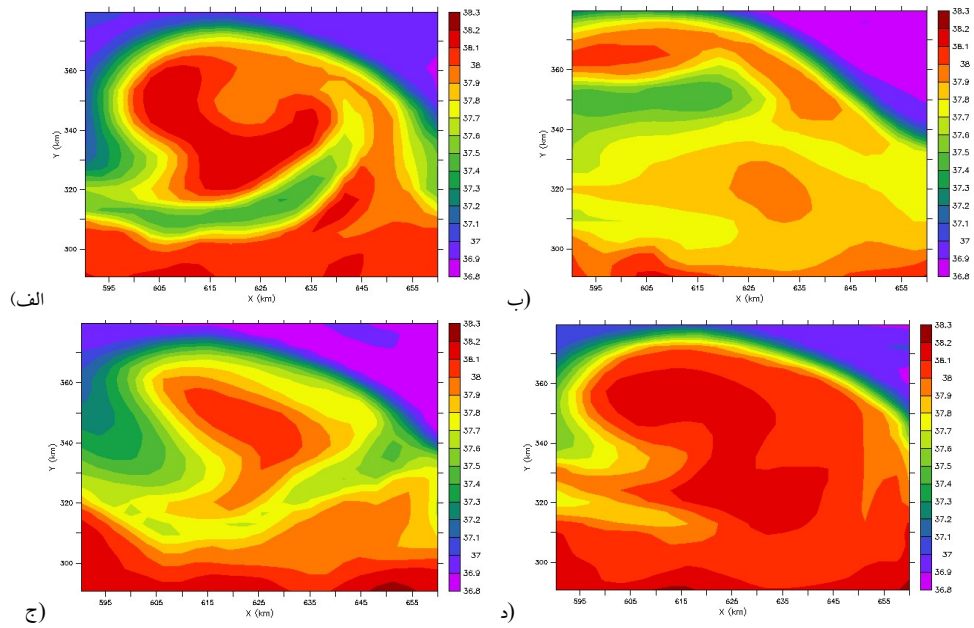
شکل ۸ الگوهای جریان در خروجی آب‌های خلیج فارس به عمان در لایه عمقی را نشان می‌دهد. در بخش شمالی آب‌های با شوری کم که از عمان وارد خلیج فارس می‌شوند مشاهده می‌شود که جبهه آب‌های ورودی همراه با پیچک‌هایی هستند. در بخش جنوبی بردارهای جریان

شوری سطحی در بخش شمال غربی خلیج فارس در تابستان با چهار طرح‌واره تلاطمی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های با وضوح بالاتر می‌بینیم زبانه آب کم شور که از دریای عمان وارد خلیج فارس شده است تا بخش‌های انتهایی شمال غرب خلیج فارس می‌رسد و بردارهای جریان نشان‌دهنده سرعت بالاتر آن نسبت به آب‌های اطراف می‌باشد. آب‌ها در این بخش تحت یک چرخش پادساعت‌گرد قرار می‌گیرند و از بخش پایینی به سمت مناطق مرکزی خلیج فارس بازمی‌گردند. در مقایسه عملکرد طرح‌واره‌ها می‌بینیم که طرح‌واره بستار تلاطمی k-l و طرح‌واره جبری f-d نفوذ زبانه آب کم شور را طولانی‌تر تخمین می‌زنند و همچنین در برآورد توزیع شوری سطحی به مشاهدات، نتایج نزدیک‌تری دارد.

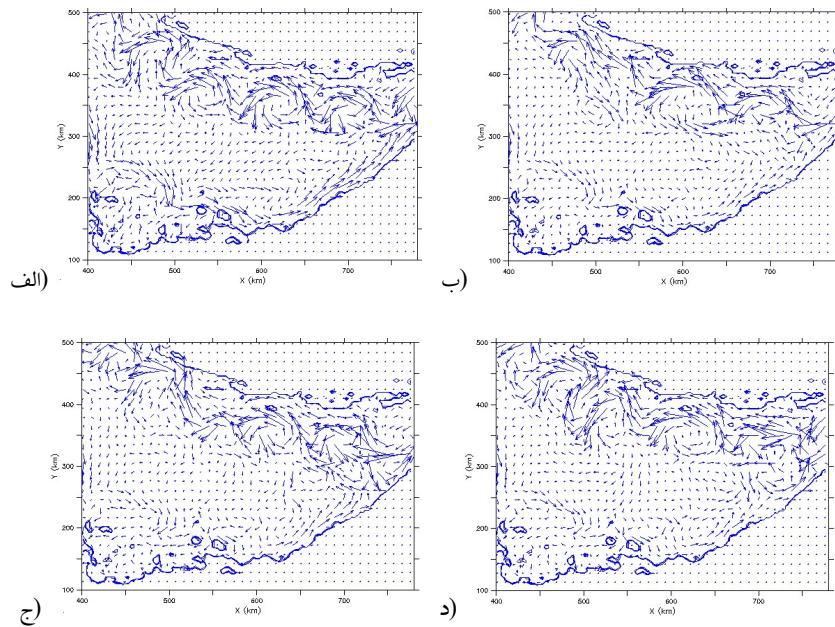
شکل ۶، ادی نشان داده شده در شکل ۲ را با وضوح بالاتر توسط چهار طرح‌واره تلاطمی نشان می‌دهد. واضح است که طرح‌واره f-d در شبیه‌سازی پیچک‌های میان‌مقیاس، نسبت به سایر طرح‌واره‌ها نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد. طرح‌واره p-p در این شبیه‌سازی ضعیف عمل



شکل ۵. شبیه‌سازی نفوذ زبانه آب‌های شیرین تا بخش شمال غربی خلیج فارس. الف) f-d (ب) pp (ج) k-l (د) k-e.



شکل ۶. شبیه سازی شکل گیری پیچک های میان مقیاس در بخش میانی خلیج فارس در طی ناپایداری کژ فشاری، مشخص شده در شکل ۲ در روز ۹۰ ام. الف- f- (ب d pp (ج k-l (د k-ε



شکل ۷. شبیه سازی الگوی جریانات سطحی در ناحیه میانی و بخش شمالی خلیج فارس در فصل تابستان با استفاده از چهار طرحواره تلاطمی.

الف (b f-d (ج k-l (د k-ε



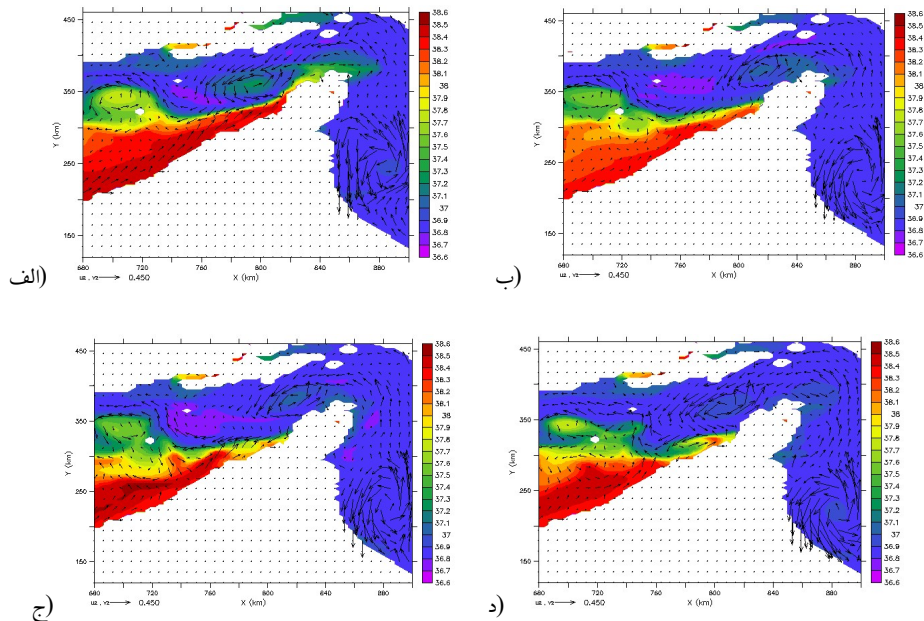
به خوبی برآورد شده است چون در مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌ها این اختلاف ۰/۳ psu می‌باشد. شوری توسط طرح‌واره pp، دست پایین تخمین زده شده است. طرح‌واره f-d در این شبیه‌سازی نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد.

## ۲-۴ عملکرد طرح‌واره‌های تلاطمی در برآورد پارامتر دما

در این بخش عملکرد طرح‌واره‌های تلاطمی در شبیه‌سازی الگوهای دما و دماشیب بررسی می‌شود. شکل ۱۰ توزیع دمای سطحی در خلیج فارس در زمستان (ماه ژانویه) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌ها می‌بینیم آب‌های گرم از ناحیه دریای عمان و از طریق تنگه هرمز وارد خلیج فارس می‌شوند در مقایسه با مشاهدات میدانی، طرح‌واره‌های P-P، k-l و k-ε نزدیک‌ترین الگو را به اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند.

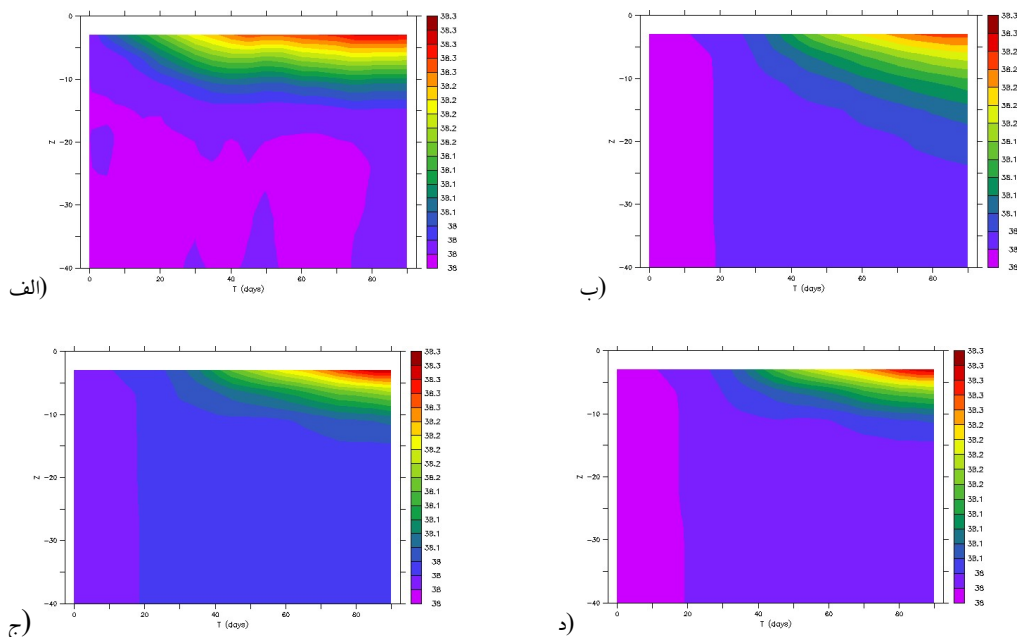
آب‌های شور خلیج فارس هستند که از تنگه هرمز خارج می‌شوند و به عمان می‌ریزند. در مقایسه بین عملکرد طرح‌واره‌ها، طرح‌واره f-d در شبیه‌سازی شوری کف و الگوهای جریان‌های ورودی و خروجی، بهتر از بقیه طرح‌واره‌ها عمل می‌کند. هر چند طرح‌واره‌های بستار تلاطمی هم الگوهای جریان را خوب نشان می‌دهند. طرح‌واره pp در این شبیه‌سازی ضعیف‌تر عمل می‌کند.

شکل ۹ تغییرات شوری با زمان و عمق را در ایستگاه ۱ (x=200, y=600) در فصل تابستان نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی همه طرح‌واره‌ها تکامل زمانی لایه‌بندی شوری را به خوبی نشان می‌دهند. شروع لایه بندی در طرح‌واره‌های جبری در روز ۱۰ ام و در طرح‌واره‌های بستار تلاطمی در روز ۳۰ ام شبیه‌سازی است. همه طرح‌واره‌ها اختلاف شوری سطح و عمق را ۰/۴ psu نشان می‌دهند که در مقایسه با مشاهدات میدانی، می‌بینیم که اختلاف شوری سطح و عمق



شکل ۸. توزیع افقی شوری و بردارهای جریان ورودی به خلیج فارس در تنگه هرمز در کف با استفاده از چهار طرح‌واره تلاطمی:

(الف) f-d (ب) pp (ج) k-l (د) k-ε



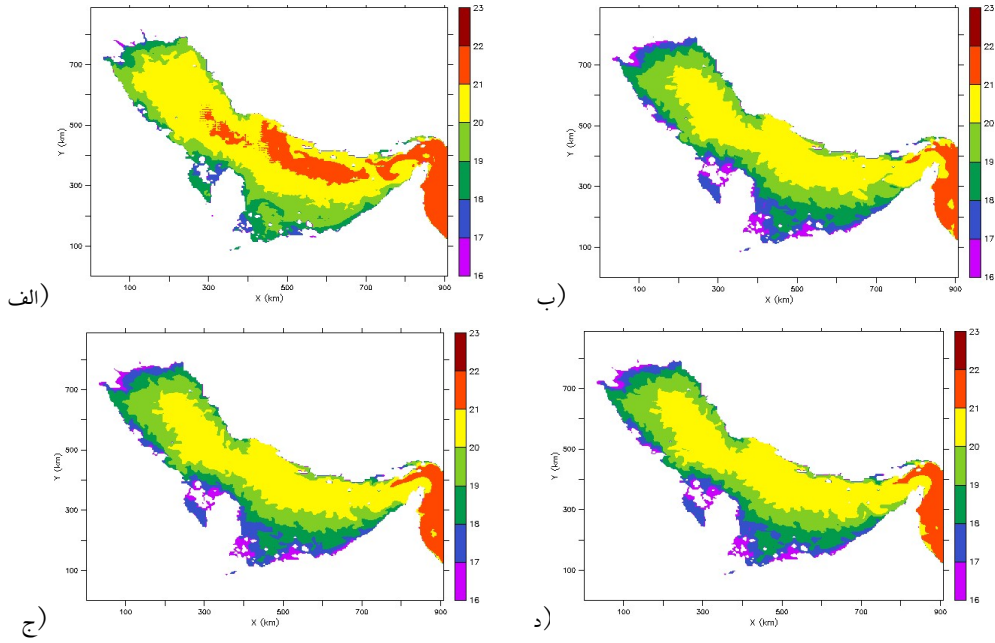
شکل ۹. تغییرات شوری با عمق و زمان در ایستگاه ادر تابستان با استفاده از چهار طرح‌واره تلاطمی. الف) f-d (ب) pp (ج) k-l (د) k-ε

پارامترهای تلاطمی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. شکل ۱۲ مقطع قائم انرژی جنبشی تلاطمی، نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطمی، و شکسانی پیچکی و پخش پیچکی برآورد شده توسط چهار طرح‌واره تلاطمی را در فصل زمستان نشان می‌دهد. در مقایسه عملکرد بین طرح‌واره‌ها در برآورد اندازه انرژی جنبشی تلاطمی و نرخ اتلاف انرژی طرح‌واره‌های بستر تلاطمی k-l و k-ε نزدیک‌ترین مقادیر را نسبت به مشاهدات جهانی برآورد کردند. طرح‌واره‌های تلاطمی جبری در برآورد این پارامتر بسیار ضعیف عمل می‌کنند؛ زیرا طرح‌واره‌های بستر تلاطمی از معادلات پیش‌یابی استفاده می‌کنند ولی طرح‌واره‌های جبری از معادلات تجربی استفاده می‌کنند. پروفایل‌های قائم و شکسانی پیچکی و پروفایل‌های قائم پخش پیچکی برآورد شده نشان می‌دهند که در مقایسه با مقادیر جهانی، طرح‌واره f-d مقادیر و شکسانی پیچکی و پخش پیچکی را غیرواقعی نشان می‌دهد.

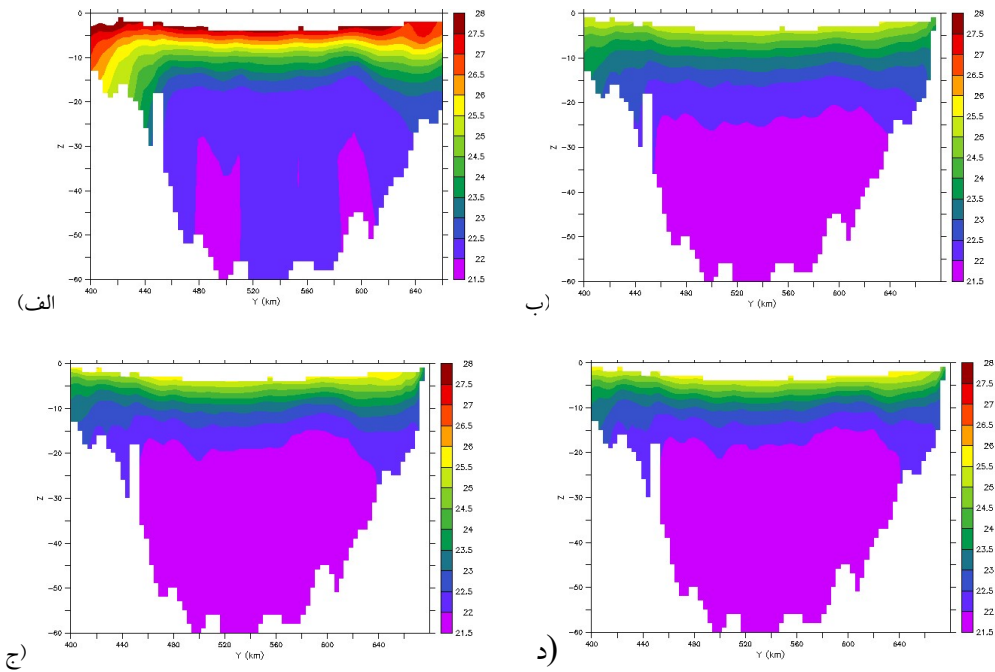
شکل ۱۱ نیم‌رخ قائم دما را در برش A (شکل ۱) در تابستان با استفاده از چهار طرح‌واره تلاطمی نشان می‌دهد. گرادیان قابل ملاحظه در برش قائم دما، نشان‌دهنده تشکیل دماشیب در تابستان است. در مقایسه با مشاهدات، همه طرح‌واره‌ها در شبیه‌سازی عمق دماشیب موفق بوده‌اند ولی تفاوت‌هایی در برآورد شدت دماشیب بین طرح‌واره‌ها وجود دارد. طرح‌واره‌های بستر تلاطمی نسبت به طرح‌واره‌های جبری شدت دماشیب را بیشتر و با پخش کمتر نشان می‌دهند. طرح‌واره جبری P-P نسبت به بقیه طرح‌واره‌ها ضعیف‌تر عمل می‌کند و شدت دماشیب را کمتر و با پخش زیاد نشان می‌دهد همچنین دمای سطحی را دست پایین تخمین می‌زند. طرح‌واره f-d در تخمین دمای سطحی به خوبی عمل می‌کند.

### ۳-۴ عملکرد طرح‌واره‌های تلاطمی در برآورد پارامترهای تلاطمی

در این بخش عملکرد طرح‌واره‌های تلاطمی در پیش‌بینی



شکل ۱۰. توزیع دمای سطحی در خلیج فارس در ماه ژانویه با استفاده از چهار طرح‌واره تلاطمی. الف) f-d (ب) pp (ج) k-l (د) k-ε



شکل ۱۱. نیم‌رخ قائم دما در برش A در تابستان با استفاده از چهار طرح‌واره تلاطمی. الف) f-d (ب) pp (ج) k-l (د) k-ε

جدول ۲. بیشینه انرژی جنبشی تلاطمی (J/kg) در سطح و کف برای چهار طرح‌واره تلاطمی در فصل زمستان ( $10^{-3} \times$ ).

Scheme	k-l		k-ε		f-d		P-P	
	Surface	bottom	Surface	bottom	Surface	bottom	Surface	bottom
Station1	0.19	0.003	0.11	0.0027	0.026	0.002	0.013	0.001
Station2	0.16	0.0026	0.13	0.0028	0.026	0.001	0.013	0.001
Station3	0.12	0.0018	0.17	0.0046	0.026	0.001	0.013	0.001

شمال غربی خلیج فارس کشیده می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که شوری توسط همه طرح‌واره‌ها با دقت پیش‌بینی شده است. ساختار جبهه بین دو آب ورودی و خروجی دارای پیچک‌های میان‌مقیاس تا زیر میان‌مقیاس است. در مقایسه عملکرد طرح‌واره‌ها، طرح‌واره وابسته به جریان، نفوذ زبانه کم شور به خلیج فارس را از همه طرح‌واره‌ها بهتر شبیه‌سازی می‌کند و طول این زبانه را نسبت به بقیه بلندتر تخمین می‌زند. در بین بستارهای تلاطمی طرح‌واره k-l نسبت به طرح‌واره k-ε عملکرد بهتری دارد. بررسی تغییرات شوری با زمان و عمق در ایستگاه ۱ در فصل تابستان بیانگر این است که اعمال همه طرح‌واره‌های تلاطمی تکامل زمانی لایه‌بندی شوری را به خوبی نشان می‌دهند. در مقایسه بین عملکرد طرح‌واره‌ها در طرح‌واره‌های جبری شروع لایه‌بندی در روز ۱۰ام و در طرح‌واره‌های بستار تلاطمی در روز ۳۰ام شبیه‌سازی است. - الگوهای جریان در ناحیه میانی خلیج فارس در فصل تابستان در لایه سطحی را نشان می‌دهد. در بخش شمالی جبهه آب‌های ورودی همراه با پیچک‌هایی هستند. در بخش جنوبی بردارهای جریان آب‌های خلیج فارس هستند که به سمت شرق و به طرف تنگه هرمز حرکت می‌کنند. در مقایسه بین عملکرد طرح‌واره‌ها طرح‌واره f-d سرعت جریان را بیشتر تخمین می‌زند و بهتر از بقیه طرح‌واره‌ها قادر به شبیه‌سازی پیچک‌ها می‌باشد. هر چند بستارهای تلاطمی هم الگوهای جریان را خوب نشان می‌دهند. طرح‌واره pp در این شبیه‌سازی ضعیف‌تر عمل می‌کند.

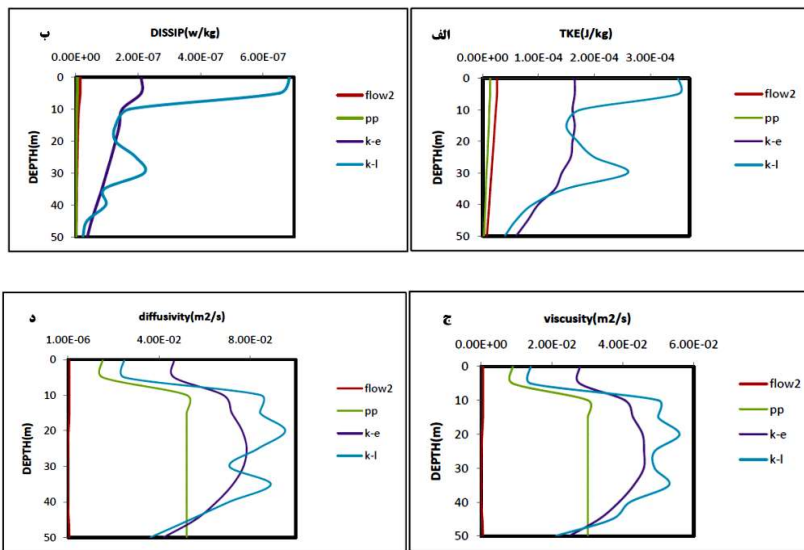
شکل ۱۳ منحنی تغییرات انرژی جنبشی تلاطمی، اتلاف انرژی جنبشی تلاطمی و طول اختلاط را با زمان، توسط چهار طرح‌واره تلاطمی در فصل زمستان نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که طرح‌واره‌های جبری تغییرات این پارامترها را با زمان نشان نمی‌دهند و اندازه آن را با زمان ثابت نشان می‌دهند ولی طرح‌واره‌های بستار تلاطمی به خوبی تغییرات انرژی جنبشی تلاطمی را با زمان نشان می‌دهند. در بین بستارهای تلاطمی نیز، طرح‌واره بستار تلاطمی درجه دو و نیم، k-l نسبت به طرح‌واره بستار تلاطمی درجه یک و نیم، k-ε بهتر عمل می‌کند.

جدول ۲. بیشینه انرژی جنبشی تلاطمی (J/kg) در سطح و کف برای چهار طرح‌واره تلاطمی ( $10^{-3} \times$ ) برای سه ایستگاه در فصل زمستان نشان می‌دهد. مقادیر برآورد شده توسط طرح‌واره‌های بستار تلاطمی به مقادیر واقعی در مقیاس جهانی نزدیک‌ترند. طرح‌واره‌های جبری مقدار این پارامتر را دست پایین تخمین می‌زنند.

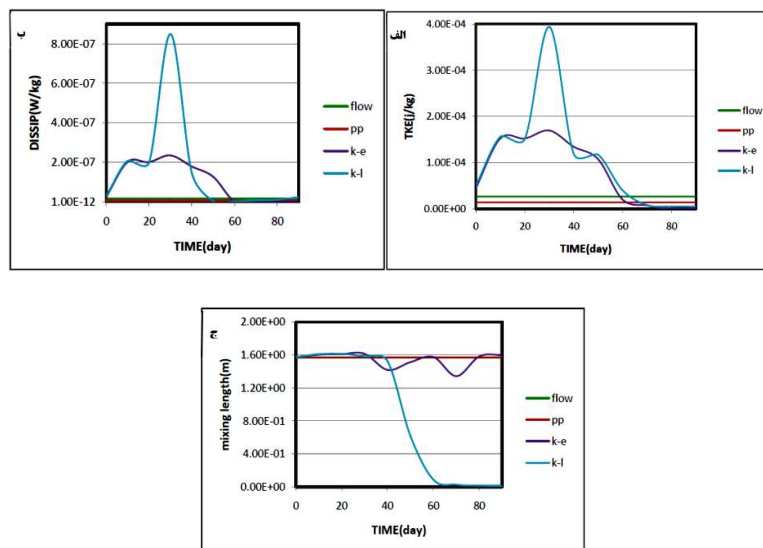
## ۵ بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد طرح‌واره‌های تلاطمی در شبیه‌سازی هیدرودینامیک خلیج فارس مطالعه شدند. برای بررسی عملکرد طرح‌واره‌ها در پیش‌بینی الگوهای شوری و دما و پارامترهای تلاطمی چهار اجرا با چهار طرح‌واره تلاطمی انجام شد. نتایج تحقیق به صورت زیر است:  
- آب‌های با شوری کم از ناحیه دریای عمان و از طریق تنگه هرمز وارد خلیج فارس می‌شوند و این زبانه آب کم شور تا





شکل ۱۲. پارامترهای تلاطمی الف) مقطع قائم انرژی جنبشی تلاطمی، ب) نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطمی ج) وشکسانی پیچکی د) پخش پیچکی.



شکل ۱۳. منحنی تغییرات الف) انرژی جنبشی تلاطمی، ب) اتلاف انرژی جنبشی تلاطمی و ج) طول اختلاط با زمان، در فصل زمستان.

پیچک‌های میان‌مقیاس است. در شبیه‌سازی پیچک‌های میان‌مقیاس، طرح‌واره f-d نسبت به سایر طرح‌واره‌ها نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد. طرح‌واره p-p در این شبیه‌سازی

– نفوذ زبانه کم شور از عمان به خلیج فارس باعث تشکیل یک ناپایداری کژفشاری در سواحل شمالی خلیج می‌شود. ساختار جبهه بین دو آب ورودی و خروجی دارای

نمی‌دهند و اندازه آن را با زمان ثابت نشان می‌دهند ولی طرح‌واره‌های بستار تلاطمی به خوبی تغییرات انرژی جنبشی تلاطمی را با زمان نشان می‌دهند. در بین بستارهای تلاطمی نیز، طرح‌واره بستار تلاطمی درجه ۲/۵،  $k-l$  نسبت به طرح‌واره بستار تلاطمی درجه ۱/۵،  $k-\varepsilon$  بهتر عمل می‌کند.

- در برآورد پیشینه انرژی جنبشی تلاطمی ( $J/kg$ ) در سطح و کف برای چهار طرح‌واره تلاطمی ( $\times 10^{-3}$ ) برای سه ایستگاه در فصل زمستان نتایج نشان می‌دهد که مقادیر برآورد شده توسط طرح‌واره‌های بستار تلاطمی به مقادیر واقعی در مقیاس جهانی نزدیک‌ترند. طرح‌واره‌های جبری مقدار این پارامتر را دست پایین تخمین می‌زنند.

به طور کلی، مطالعه ساختار قائم در حوضه‌های آبی و فرایابی تلاطم در ستون آب، بسیار حساس به انتخاب نوع طرح‌واره تلاطم است ولی تغییر طرح‌واره تلاطمی در شبیه‌سازی ساختارهای بزرگ مقیاس در راستای افق که در جریان‌های ورودی و خروجی رخ می‌دهند تأثیر کمتری دارد و بررسی مطالعات دیگران نشان می‌دهد که شبیه‌سازی الگوی جریان‌ات و گردش آب‌ها، بیشتر به تغییر طرح‌واره‌های فرارفتی حساس هستند. مقایسه بین نتایج مدل و اندازه‌گیری‌های میدانی نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم نشان می‌دهد که همه مدل‌ها به اصلاح از طریق پارامتربندی امواج داخلی نیاز دارند تا بتوانند سطوح اتلاف انرژی جنبشی ناشی از تلاطم را با دقت بیشتری پیش‌بینی کنند.

#### منابع

- رودی، ولفگانگ. ۱۳۸۸. مدل‌های آشفستگی و کاربردهای آن در هیدرولیک: موسسه انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی.
- Alessi, C.A., Hunt, H.D., Bower, A.S., 1999, Hydrographic data from the U.S. naval oceanographic office, Persian Gulf, Southern Red Sea, and Arabian Sea 1923-1996: Woods Hole Oceanographic Institution, USA. 74P.

ضعیف عمل می‌کند. در بین بستارهای تلاطمی، طرح‌واره  $k-l$  نسبت به طرح‌واره  $k-\varepsilon$  عملکرد بهتری دارد.

- توزیع دمای سطحی در خلیج فارس در زمستان (ماه ژانویه) نشان می‌دهد که آب‌های گرم از ناحیه دریای عمان و از طریق تنگه هرمز وارد خلیج فارس می‌شوند در مقایسه با مشاهدات میدانی، طرح‌واره‌های  $k-l$ ،  $P-P$  و  $k-\varepsilon$  نزدیک‌ترین الگو را به اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند. طرح‌واره  $f-d$  دمای سطحی خلیج فارس در این فصل را دست بالا تخمین می‌زنند.

- نیمرخ قائم دما در تابستان با استفاده از چهار طرح‌واره تلاطمی نشان‌دهنده‌گرادیان قابل ملاحظه در برش قائم دما و تشکیل دماشیب در تابستان است. در مقایسه با مشاهدات، همه طرح‌واره‌ها در شبیه‌سازی عمق دماشیب موفق بوده‌اند ولی تفاوت‌هایی در برآورد شدت دماشیب بین طرح‌واره‌ها وجود دارد. طرح‌واره‌های بستار تلاطمی شدت دماشیب را نسبت به طرح‌واره‌های جبری بیشتر نشان می‌دهند. به طور کلی طرح‌واره  $f-d$  در این شبیه‌سازی بهتر عمل می‌کند.

- پروفایل‌های قائم انرژی جنبشی تلاطمی و نرخ اتلاف انرژی شبیه‌سازی شده طرح‌واره‌های بستار تلاطمی  $k-l$  و  $k-\varepsilon$  نزدیک‌ترین نتایج را نسبت به مشاهدات جهانی برآورد کردند. طرح‌واره‌های تلاطمی جبری در برآورد این پارامترها بسیار ضعیف عمل می‌کنند. زیرا طرح‌واره‌های بستار تلاطمی از معادلات پیش‌یابی استفاده می‌کنند ولی طرح‌واره‌های جبری از معادلات تجربی استفاده می‌کنند. پروفایل‌های قائم وشکسانی پیچکی و پروفایل‌های قائم پخش پیچکی برآورد شده نشان می‌دهند که در مقایسه با مقادیر جهانی، طرح‌واره  $f-d$  مقادیر وشکسانی پیچکی و پخش پیچکی را غیرواقعی نشان می‌دهد.

- بررسی منحنی تغییرات انرژی جنبشی تلاطمی، اتلاف انرژی جنبشی تلاطمی و طول اختلاط با زمان، توسط چهار طرح‌واره تلاطمی در فصل زمستان نشان می‌دهد که طرح‌واره‌های جبری تغییرات این پارامترها را با زمان نشان

- Souza de, J. L., Lima de A. L., Rota de Oliveira, I., Dias Soares, and Magalhaes Mata, M., 2013, Incorporation of new turbulent closure schemes in the Princeton ocean model (pom): *Revista Brasileira de Geofisica*, 31(1), 17–30.
- Bidokhti, A. A. and Ezam, M., 2009, The Structure of the Persian Gulf outflow subjected to density variations: *Ocean Science*, 5, 1–12.
- Blackadar, A. K., 1962, The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere: *Journal of Geophysical Research*, 67, 3095–3102.
- Bowden K. F., Fairbairn L. A. and Hughes P., 1959, The distribution of shearing stresses in a tidal current: *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2, 288–305.
- Davies A. M., 1990, On extracting tidal current profiles from vertically integrated twodimensional hydrodynamic models: *Journal of Geophysical Research*, 95, 18317–18342.
- Davies A.M., 1993. A bottom boundary layer-resolving three-dimensional tidal model : A sensitivity study of eddy viscosity formulation: *Journal of Physical Oceanography*, 23, 1437–1453.
- Durski, S. M., Glenn, S. M., and Haidvogel, D. B., 2004, Vertical mixing schemes in the coastal ocean, Comparison of the level 2.5 Mellor-Yamada scheme with an enhanced version of the K profile parameterization: *Journal of Geophysical Research*, vol 109.
- Galperin, B., Kantha, L. H., Hassid, S. and Rosati, A. A., 1988, quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45, 55–62.
- Glorioso P. D. and Davies A. M., 1995, The influence of eddy viscosity formulation, bottom topography, and wind wave effects upon the circulation of a shallow bay: *Journal of Physical Oceanography*, 25, 1243–1264.
- Ilicak, M., Ozgokmen, T. M., Peters, H., Baumert, H. Z., and Iskandarani, M., 2008, Performance of two-equation turbulence closures in three-dimensional simulations of the Red Sea overflow: *Ocean Modelling* 24, 122–139.
- Li, X., Chao, Y., McWilliams, J. C., and Lueng Fu, L. A., 2001, Comparison of Two Vertical-Mixing Schemes in a Pacific Ocean General Circulation Model: *Journal of climate*, Volume 14(7), 1377–1398.
- Liu, W. C. Chen, W. B. Hsu, M. H., 2010, Application of different turbulence closure model to investigate residual current and salinity in an estuary: *Journal of Coastal and Ocean Eng*, 10, 1–24.
- Luyten, P. J., Deleensnijder, E., Ozer, J., and Ruddick, K. G., 1996, Presentation of a family of turbulence closure models for stratified shallow water flows and preliminary application to the Rhine outflow region: *Continental Shelf Res*, 16, 101–130.
- Mellor G.L. and Yamada T., 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems: *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 20, 851–875.
- Mohandesi Namin, M., Bidokhti, A. A., Karami Khaniki, A., Torabi Azad, M., and Hasan zadeh, I., 2017, Estimation of Turbulence Parameters in a Shallow Sea Using Numerical Simulation with Sensitivity to Vertical Mixing Parameterization: *Indian journal of Geo Marine Science*, 46(09), 1788–1798.
- Obino, R. S., Chu, P. C., and Haeger, S. D., 2002, Simulation of the Bohai Sea Circulation and Thermohaline Structure Using COHERENS Model, Master's Thesis: NAVAL Postgraduate School, Monterey.
- Pacanowski R. C., and Philander S. G. H., 1981, Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans: *Journal of Physical Oceanography*, 11, 1443–1451.
- Semtner, A. J., and Chervin, R. M., 1988, A simulation of the global ocean circulation with resolved eddies: *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 93, 15502–15522.
- Ttuomi, L., and Myrberg, K., 2011, The performance of vertical turbulence models in the modeling of hydrodynamics in the Baltic Sea: *Geophysical Research Abstracts* 13, 6662.
- Wijesekera, H. W., Allen, J. S., and Newberger, P. A., 2003, Modeling study of turbulent mixing over the continental shelf, Comparison of turbulent closure schemes: *Journal of Geophysical Research*, 108 (c3), 3103.

## A comparative numerical study of water circulation in the Persian gulf using different turbulence schemes

Mastaneh Mohandesi Namin<sup>1\*</sup> and Abas Ali Aliakbari Bidokhti<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Mathematics department, Astara branch, Islamic Azad University, Astara, Iran

<sup>2</sup> Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 31 August 2022, Accepted: 08 December 2022)

### Summary

The complex process of turbulent mixing in the Persian Gulf which is a semi-closed sea makes it a good option for testing the performance of different turbulence schemes in the numerical simulation of water circulation in it.

Calculating or predicting the flow and water circulation in such semi-enclosed sea, by taking the turbulence into account, is important in every respect, for example in terms of spread of contaminations, environmental, fisheries, shipping, and even the military. In this study, the 3D ocean model COHERENS (COupled Hydrodynamical Ecological model for REgionAl

Shelf seas) is used for water circulation simulation of the Persian Gulf. Cartesian coordinate system is used for horizontal direction and sigma coordinate with 10 layers is used for the vertical direction. Persian Gulf coastline and its bathymetry are based on ETOPO-2 data, which are obtained from the digital data of seabed and bulge of the earth with latitudinal and longitudinal geographical two-minute networks. The model is forced by climatologic monthly mean atmospheric forcing at 10-m reference height above ground derived from 54 years (1948–2002) of National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) data. The advection scheme that is used for momentum and scalars is either total variation diminishing (TVD) scheme, which uses the super bee limiter. The uniform bottom friction coefficient was chosen at 0.005 (m/s) and uniform value for the bottom roughness length that was chosen as 0.015 (m), based on the bottom roughness of the basin. Four turbulence schemes are implemented in the model to test their performance. These include two turbulence closure schemes of k- $\epsilon$ , k-l (Mellor–Yamada), and two algebraic schemes of Pacanowski and Philander and flow-dependent scheme. For the k- $\epsilon$  and k-l models, we used one-equation model for transport equation, the “Blackadar” formulation for mixing length, and limiting conditions for turbulence variables are enabled. The stability functions are expressed in terms of the Richardson number. In the numerical simulation of water circulation in the Persian Gulf, the turbulence schemes are studied to investigate salinity and temperature parameters, flow patterns in the surface and bottom, meso-scale eddies and turbulence parameters including the turbulent kinetic energy and energy dissipation rate, the mixing length, eddy adhesion and eddy diffusivity. The model has been successful in simulating the intrusion of low salinity waters into the Persian Gulf and baroclinic instability and the formation of mesoscale eddies in the center of the basin. In comparison between the performance of schemas, the results show that the schemes are very sensitive in estimating the turbulence parameters and simulation of flow patterns, vorticity, salinity and temperature, show less sensitivity to the performance of various turbulence schemes.

**Keywords:** Turbulence schemes, water circulation, COHERENS model, Persian Gulf

---

\*Corresponding author:

ma.mohandesi@iaui.ac.ir