

## بررسی امکان رخداد فراجوشی ساحلی در حوالی دماغه جاسک

حسینیه قائمی<sup>۱</sup>، مریم راهبانی<sup>۲</sup>، سعید شربتی<sup>۳</sup>

hosnie.ghaemi@yahoo.com

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناس ارشد فیزیک دریا، دانشگاه هرمزگان، بندر عباس

maryamrahbani@yahoo.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندر عباس

s\_sharbaty@yahoo.com

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹

### چکیده

هدف از این تحقیق، مطالعه و بررسی رخداد پدیده اقیانوسی-جوی فراجوشی در سواحل ایرانی دریای عمان است. به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد نواحی فراجوشی، مطالعه آن در امتداد سواحل جاسک حائز اهمیت است. به منظور بررسی رخداد فراجوشی ساحلی در جاسک از نرم‌افزار آرک جی ای اس و مدل هیدرودینامیکی نرم‌افزار مایک ۳ استفاده شد. با نرم‌افزار آرک جی ای اس، نقشه‌های الگوی باد غالب، دمای سطح دریا و فراوانی غلظت کلروفیل-a با استفاده از داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای به عنوان شواهد اولیه مبنی بر وقوع سیستم فراجوشی برای سال ۲۰۱۶ آماده شد. در بخش شبیه‌سازی از یک شبکه بندی افقی با تکنیک مش بندی نامنظم و شبکه بندی قائم با ۱۰ لایه سیگما در نرم‌افزار مایک ۳ استفاده شد. پس از تنظیم، اجرا و کالیبره کردن مدل، نتایج برای بندر جاسک مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج به همراه تصاویر ماهواره‌ای که با نرم‌افزار آرک جی ای اس، بازخوانی شده، نشان‌دهنده رخداد فراجوشی ساحلی در بندر جاسک در دوره گذر از مونسون (اکتبر و نوامبر) بود که با الگوی باد غالب در دریای عمان به خصوص در سواحل جنوب شرقی ایران کاملاً مطابقت دارد.

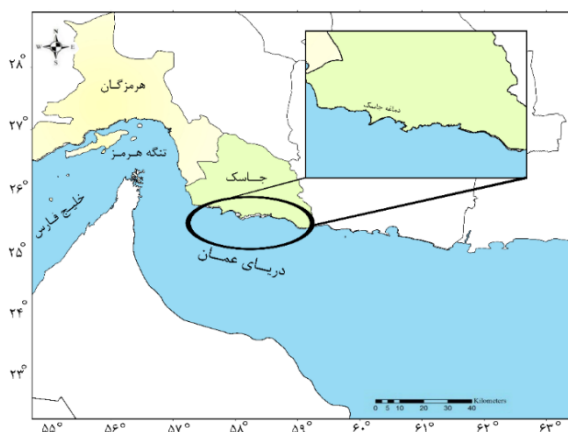
واژه‌های کلیدی: فراجوشی ساحلی - دریای عمان، جاسک، مایک ۳

### ۱. مقدمه

در نیم کره شمالی، هرگاه وزش باد به گونه‌ای باشد که ساحل در سمت چپ جهت باد قرار گیرد، تنش سطحی ایجاد شده همراه با نیروی کوریولیس، سبب انتقال جرم اکمن در امتداد عمود بر ساحل و به سمت دریا خواهد شد. به دلیل وجود ساحل در سمت چپ باد، آب جابه‌جاشده نمی‌تواند با آب‌های سطحی جایگزین شود، در این حالت، آب‌های

زیرین لایه اکمن طی فرایند انتقال عمودی آب، جایگزین آب سطحی دور شده از ساحل خواهند شد. به این صورت، فراجوشی ساحلی رخ می‌دهد [۱]. برای وقوع این فرایند در نیم کره جنوبی، ساحل باید در سمت راست جهت وزش باد قرار گرفته باشد. بنابراین می‌توان گفت که فراجوشی ساحلی شکل‌گیری خود را مدیون وجود ساحل به عنوان یک مرز

محل دریا عمان را مورد مطالعه قرار دادند. لازم به ذکر است که ای.دی.سی.پی. یک ابزار اندازه گیری بر اساس اثر داپلر بوده که قادر به اندازه گیری سرعت جریان در سراسر ستون آب است. آن‌ها در این مطالعه بیان کردند؛ در قسمت شرقی دریای عمان گردش‌های محلی شامل گردابه‌های سایکلونی (ساعتگرد) وجود دارد، اما در بخش غربی دریای عمان این گردش‌ها بسیار پیچیده‌ترند که همراه با یک جریان خروجی از آب‌های خلیج فارس و جریان‌های جنوب شرقی در اعماق بالاتر از ۲۵۰ متری در امتداد سواحل عمانی، و یک گردش مجدد ناشی از فراجوشی در سواحل ایرانی است. به گفته این محققان، در نزدیکی سواحل ایرانی (در نزدیکی جاسک) بین عرض جغرافیایی  $25^{\circ}$  شمالی و طول جغرافیایی  $58^{\circ}45'$  تا  $59^{\circ}15'$  شرقی، مسیر آب‌های سردتر و تازه‌تر ( $27/5$ ،  $36/4$  psu) یک گردش آنتی سایکلونی را طی می‌کنند که در امتداد سواحل ایران به سمت غرب هدایت می‌شوند. در نهایت این مسیر آب‌های سرد در سطح، نزدیک ۱۰ متر بالا می‌آیند که ممکن است، نشان از وقوع فراجوشی باشد. آن‌ها برای اثبات این نظریه، داده‌های باد با دقت مکانی  $0/5^{\circ}$  در ماه‌های اکتبر و نوامبر سال ۱۹۹۹ میلادی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و معلوم شد که در قسمت شمال غربی دریای عمان از ۱۶ تا ۲۰ اکتبر، بادهای به سوی شرق/جنوب شرقی می‌وزند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی بندر جاسک (منطقه مورد مطالعه)

آن‌ها همچنین جریان‌ها را طی ماه اکتبر در نزدیکی  $25^{\circ}$  شمالی و  $59^{\circ}15'$  شرقی مورد بررسی قرار دادند. براساس

جانبی نفوذناپذیر و آب‌های نسبتاً کم عمق فلات قاره است [۲]. سواحل اقیانوس‌ها و دریاها که در آن فراجوشی رخ می‌دهد، اغلب به عنوان غنی‌ترین نواحی زیستی به شمار می‌روند [۳].

به این جهت فراجوشی یک رویداد بسیار مهم به شمار می‌رود که انتقال مواد مغذی را در سراسر فلات قاره آسان‌تر کرده [۴] و به افزایش بهره‌وری زیستی و رونق صنعت شیلات آن منطقه منجر می‌شود. همچنین آب سرد بالا آمده بر آب‌وهوای منطقه تأثیر می‌گذارد، به نحوی که دمای سطح دریا را کاهش داده و دما و رطوبت منطقه ساحلی را متعادل می‌سازد [۵].

بر اساس گزارش‌ها و تحقیقات علمی [۶ و ۷]، در بخش‌هایی از شمال غرب دریای عمان در امتداد سواحل بندر جاسک پتانسیل ایجاد فراجوشی وجود دارد؛ بنابراین در این تحقیق به بررسی این پدیده پرداخته شده است. با این هدف شبیه‌سازی سه بعدی در سواحل ایرانی دریای عمان با استفاده از مدل مایک ۳ به منظور شناخت بیشتر الگوی جریان در منطقه و بررسی امکان رویداد پدیده فراجوشی در منطقه جاسک انجام شد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. دریای عمان پهنه‌ای آبی است که در شمال غربی دریای عرب، اقیانوس هند و شرق تنگه هرمز و خلیج فارس قرار گرفته است. الگوی گردش در این حوضه شامل یک جریان خروجی از تنگه هرمز تا اعماق تقریباً ۲۰۰ متری است که در سراسر حوضه گسترش می‌یابد و دیگری، چرخش گردابه‌ای ساعتگرد در غرب و پادساعتگرد در شرق است [۶]. فصل مشترک بین این دو گردابه در خلاف جهت هم، در مناطقی است که به گفته محققان فراجوشی در امتداد سواحل ایران رخ می‌دهد. این الگوی گردش در تابستان و زمستان وجود دارد، اما قدرت و احتمال وقوع فراجوشی آن به بادهای غالب وابسته است [۶].

پوئس و همکاران [۷] طی آزمایش‌های علمی که از ماه اکتبر تا اوایل نوامبر سال ۱۹۹۹ انجام دادند، با استفاده از داده‌های میدانی به دست آمده از دستگاه ای.دی.سی.پی. ۱ و بویه‌های شناور، هسته آب گرم و شور خلیج فارس و گردش‌های

اقیانوسی جهانی هایکام<sup>۹</sup> و داده‌های ماهواره‌ای دما در محدوده بندر جاسک، درستی سنجی مدل توسعه یافته، انجام شد.

#### ۲-۱. محاسبات عددی

همان‌طور که گفته شد، در بخش شبیه‌سازی از مدل هیدرودینامیکی مایک<sup>۳</sup> فلوو مدل اف ام<sup>۱۰</sup> استفاده شد. این سیستم مدل‌سازی با مش‌بندی انعطاف‌پذیر، برای دریاهای عمیق، مصب‌ها و نواحی ساحلی کاربرد دارد که براساس حل عددی معادله‌های سه‌بعدی تراکم‌ناپذیر رینولدز و ناویر-استوکس مبنی بر فرضیه‌های بوسینسکی و فشار هیدرواستاتیک است. بنابراین مدل شامل معادله‌های بقای جرم، تکانه، دما، شوری، چگالی و توربلانس است [۱۰].

برای شبیه‌سازی، اطلاعات ورودی به مدل شامل داده‌های عمق سنجی، باد، فشار و داده‌های مربوط به شرایط مرزی، شرایط اولیه؛ به‌علاوه مؤلفه‌های بودجه حرارتی به‌گونه‌ای که با مدل قابل استفاده باشند، آماده و بعد مدل اجرا شد. در این مطالعه با توجه به این که هیچ داده‌اندازه‌گیری شده از سرعت جریان و پروفایل دما در محدوده بندر جاسک موجود نبوده است، بنابراین برای صحت‌سنجی نتایج مدل مایک<sup>۳</sup> از داده‌های سرعت جریان سطحی از مدل اقیانوسی جهانی هایکام استفاده شد. همچنین برای صحت‌سنجی نتایج مربوط به دمای سطحی نیز از اطلاعات ماهواره‌ای سنجنده جئوس-پوس استفاده شد.

#### ۲-۲. برپایی مدل

نخستین گام در شبیه‌سازی عددی پدیده‌های اقیانوسی و دریایی، تهیه اطلاعات مختصات تراز نقاط مختلف بستر دریا به‌عنوان یکی از مرزهای محدوده مورد مطالعه است. به این منظور، اطلاعات مربوط به عمق سنجی منطقه مورد مطالعه از مدل جهانی سطح زمین ای توپووان<sup>۱۱</sup> واقع در پایگاه داده نوآ با قدرت تفکیک مکانی ۰/۰۱۶۶۶۶۷ درجه برای ساخت دامنه محاسباتی تهیه شد [۱۱]. جهت برپایی دامنه محاسباتی، شبکه‌بندی افقی با ۸۵۶۷ گره و ۱۵۴۴۵ المان با استفاده از تکنیک مش‌بندی نامنظم آماده شد.

تحقیق آن‌ها جریان‌ها از ۸ تا ۱۳ اکتبر غربی/شمال‌غربی بوده، اما از ۲۱ اکتبر تا ۱ نوامبر تغییر جهت داده و جنوب‌غربی می‌شود. بر اساس این مشاهدات اعلام کردند که احتمال وقوع فراجوشی بین ۱۳ تا ۲۱ اکتبر تقویت می‌شود که هم‌زمان با وزش بادهای شرق سو/جنوب‌شرق سو نیز هست [۷].

#### ۲. مواد و روش‌ها

از آن‌جا که نقشه‌های الگوی باد سطحی، تصاویر مربوط به دمای سطح دریا و فراوانی غلظت کلروفیل-a برای شناسایی اولیه وقوع فراجوشی حائز اهمیت هستند [۲ و ۳]، پس ابتدا به بررسی این شواهد با استفاده از داده‌های باد سطحی با قدرت تفکیک مکانی  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$  تهیه شده از پایگاه داده‌ی سی.ام.دبلیو.اف.<sup>۱۲</sup> [۸]، داده‌های دمای سطح دریا از سنجنده جئوس-پوس<sup>۳</sup> و داده‌های غلظت کلروفیل-a از سنجنده مودیس-آکوآ<sup>۴</sup> با قدرت تفکیک مکانی  $0.105^{\circ} \times 0.105^{\circ}$  تهیه شده از پایگاه داده نوآ<sup>۵</sup> [۹]، پرداخته شد.

به‌منظور ارائه نقشه الگوی باد سطحی، از داده‌های مؤلفه‌ای سرعت مداری ( $u_{10}$ ) و نصف‌النهاری ( $v_{10}$ ) در ارتفاع ۱۰ متری از سطح دریا استفاده شد؛ سپس با تبدیل مؤلفه‌های سرعت باد، برآیند سرعت و جهت باد محاسبه شد و در نهایت به کمک این داده‌ها الگوی باد در نرم‌افزار آرک‌مپ<sup>۶</sup> که یکی از زیرمجموعه‌های نرم‌افزار آرک جی‌ای اس<sup>۷</sup> است، ترسیم شد. برای نمایش داده‌های ماهواره‌ای مربوط به دمای سطح دریا و غلظت کلروفیل-a نیز، از ابزارمولتی‌دایمنشیال تولز<sup>۸</sup> موجود در نرم‌افزار آرک‌مپ استفاده شد. تصاویر حاصل علاوه بر این که به‌عنوان شاخص‌های اولیه برای شناسایی مناطق فراجوشی مورد استفاده قرار گرفت، برای درستی سنجی دمای سطحی شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار مایک<sup>۳</sup> نیز به کار گرفته شد.

شبیه‌سازی جریان و نحوه گردش آب و چگونگی حرکت کلی آن در دریای عمان، با استفاده از مدل هیدرودینامیکی مایک<sup>۳</sup> به‌منظور مطالعه وقوع پدیده فراجوشی انجام شد. سپس با استفاده از داده‌های سرعت جریان تهیه شده از مدل

(هند) استفاده شد. این اطلاعات تراز سطح آب از وبسایت‌های تایدفورفیشینگ و هوریر دی میریز استخراج شد [۱۲،۱۳] و به صورت از پیش تعیین شده به مدل اعمال شد.

همچنین داده‌های دمای سطح دریا با قدرت تفکیک مکانی  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$  و فاصله زمانی ۶ ساعت از پایگاه داده‌ای سی.ام. دلبلیو. اف. [۸]، داده‌های شوری سطح دریا نیز با قدرت تفکیک مکانی  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  در فاصله زمانی ۲۴ ساعت از واحد اردب<sup>۱۲</sup> واقع در پایگاه داده نوآ تهیه شد [۹].

ورودی‌های مدل با فرم متغیر در زمان در امتداد مرز باز به مدل اعمال شد. شرایط اولیه، توزیع مکانی دما و شوری در کل دامنه محاسباتی در آغاز شبیه‌سازی نقش مؤثری در شبیه‌سازی کلی مدل در طول بازه زمانی مدنظر دارد [۱۰]. شرایط اولیه برای دما و شوری به صورت ثابت یا متغیر در دامنه محاسباتی، که می‌تواند در نتیجه یک شبیه‌سازی قبلی باشد، در نظر گرفته می‌شود [۱۰].

در این تحقیق با توجه به این که شبکه محاسباتی شامل بخشی از اقیانوس هند، دریای عرب، دریای عمان و خلیج فارس است و هریک دارای ویژگی‌های فیزیکی متفاوتی از یکدیگر هستند بنابراین برای صحت نتایج مدل‌سازی شرایط اولیه به فرم متغیر در دامنه در نظر گرفته شد. بنابراین داده‌های دما و شوری از مدل اقیانوسی جهانی و پایگاه داده هایکام، با دقت مکانی  $0.08^\circ$  درجه در یک شبکه سه بعدی برای کل دامنه محاسباتی آماده شد [۱۴]. مقادیر اولیه مؤلفه‌های سرعت جریان نیز برای اولین گام زمانی برابر صفر در نظر گرفته شد. داده‌های باد نیز به صورت مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری در تراز ۱۰ متر به همراه مؤلفه فشار متوسط سطح دریا، مؤلفه‌های بودجه حرارتی شامل دمای هوا، رطوبت نسبی در فشار سطح ۱۰۰۰ میلی بار با فاصله زمانی ۶ ساعت، ترم تبخیر، بارش، تابش طول موج کوتاه و بلند با قدرت تفکیک مکانی  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$  و فاصله زمانی ۱۲ ساعت در یک شبکه دوبعدی که کل منطقه را پوشش می‌دهد از پایگاه داده‌ای سی.ام. دلبلیو. اف. تهیه و به مدل معرفی شد.

برای افزایش دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی، اندازه شبکه‌ها در نزدیکی سواحل شمال غرب دریای عمان کوچک‌تر در نظر گرفته شد.

همچنین برای کاهش زمان اجرای مدل در مناطق دورتر، شبکه‌بندی بزرگ‌تری به کار گرفته شد. به نحوی که المان‌های ایجادشده در بخش‌های عمیق دارای بزرگی بیشینه  $0.1^\circ$  (درجه)  $^2$ ، در شمال دریای عرب  $0.05^\circ$  (درجه)  $^2$ ، در دریای عمان  $0.02^\circ$  (درجه)  $^2$ ، در تنگه هرمز  $0.03^\circ$  (درجه)  $^2$ ، و در خلیج فارس  $0.05^\circ$  (درجه)  $^2$  است.

در بندر جاسک که هدف اصلی این تحقیق است، حداکثر بزرگی شبکه‌های ایجادشده  $0.1^\circ$  (درجه)  $^2$  تعیین شده است. این شبکه‌بندی دارای یک مرز دریایی اصلی در جنوب و سه مرز خشکی در شمال، شرق و غرب است (شکل ۲). شبکه‌بندی عمودی نیز بر اساس توزیع ضخامت لایه‌ها و با احتساب استخراج نتایج مناسب در مقایسه با مدت زمان اجرا انتخاب شد. در بین آزمایش‌ها با تعداد لایه‌های مختلف شامل ۵ تا ۴۰ لایه، در نهایت تعداد ۱۰ لایه مختصات سیگما با ضخامت افزایشی از بستر تا سطح، تعداد لایه بهینه در نظر گرفته شد. در جدول ۱ تعداد و ضخامت لایه‌های مدل نهایی آورده شده است. نخستین لایه سیگما به نام لایه شماره ۱ مربوط به لایه نزدیک به بستر است و با نزدیک شدن به سطح شماره لایه‌ها افزایش می‌یابد به طوری که لایه ۱۰ لایه سطحی است [۱۰].

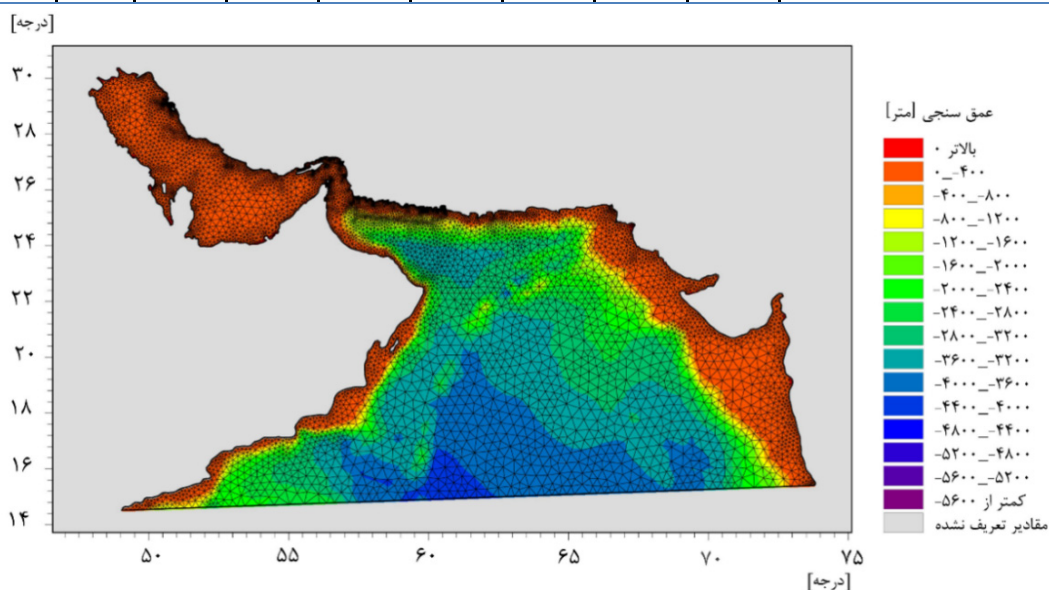
همان‌طور که گفته شد دامنه محاسباتی تنها دارای یک مرز باز در بخش جنوبی در حدفاصل بنادر مارماگائو در هند و مکلا در یمن است (شکل ۲).

از آن جا که در بسیاری از مطالعات عددی مناطق ساحلی، اعمال نیروی جزرومد، دما و شوری به مدل اغلب از طریق مرز باز انجام می‌شود [۱۰]، در این تحقیق نیز داده‌های جزر و مدی، دما و شوری به عنوان شرایط مرزی به مرز باز اعمال شد.

برای تهیه شرایط مرزی، داده‌های ارتفاع سطح آب در مرز باز جنوبی به ترتیب از داده‌های بنادر مکلا (یمن) و مارماگائو

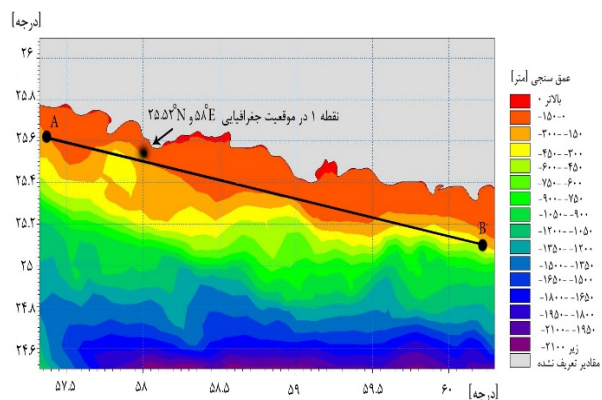
جدول ۱. ضخامت لایه‌های سیگما

| ۱   | ۲   | ۳   | ۴    | ۵    | ۶    | ۷    | ۸    | ۹    | ۱۰   | تعداد لایه‌ها           |
|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------------------------|
| ۰/۵ | ۰/۲ | ۰/۱ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ضخامت لایه (برحسب درصد) |



شکل ۲. شبکه‌بندی و عمق‌سنجی دامنه محاسباتی

برای واسنجی نتایج شبیه‌سازی با مقادیر مدل هایکام و مشاهدات ماهواره‌ای، ضرایب واسنجی مدل شامل ضریب لزجت گردابی، مقاومت بستر و ضرایب ثابت در معادله‌های تبادل حرارتی تغییر داده شد [۱۰]. به منظور نمایش بخشی از نتایج شبیه‌سازی‌ها به جهت واسنجی مدل، سری زمانی سرعت جریان در نقطه‌ای به موقعیت جغرافیایی  $25/52^{\circ}N$  و  $58^{\circ}E$  در بندر جاسک (شکل ۳) برای پنج شبیه‌سازی با ضرایب متفاوت لزجت گردابی، مقاومت بستر، و ضرایب ثابت در تبادل حرارتی در شکل ۴ نمایش داده شده است. همچنین پارامترهای متغیر در هر شبیه‌سازی در جدول ۲ آمده است.



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی نقاط انتخابی و عمق‌سنجی آن

پس از ورود داده‌های آماده شده به مدل، مدل با گام‌های زمانی متفاوتی چون ۳۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۶۰۰، ۱۸۰۰ ثانیه اجرا شد و در نهایت گام زمانی ۳۰ ثانیه به عنوان مناسب‌ترین گام زمانی از لحاظ پایداری مدل و نزدیکی نتایج به داده‌های مدل هایکام و مشاهدات ماهواره‌ای انتخاب شد. سپس مدل به مدت یک سال اجرا شد تا بعد از آن که نحوه جهت‌گیری جریان‌ها و نیز دما در اعماق به حالت پایدار رسید بتوان وقوع پدیده فراجوشی را در طی یک سال کامل بررسی نمود. همچنین لازم به ذکر است که در یک مدل سه‌بعدی برای عبور از دوره گرم کردن و رساندن شرایط مدل به حالت پایدار به خصوص برای پارامتر دما مدت زمان بیشتری نسبت به یک مدل دوبعدی نیاز است.

### ۲-۳. واسنجی مدل

به منظور واسنجی، نتایج سرعت جریان حاصل از مدل در بندر جاسک با داده‌های مدل هایکام، و نتایج مربوط به دمای سطح دریا نیز با اطلاعات ماهواره‌ای دریافتی از سنجنده جئوس-پوس با قدرت تفکیک مکانی  $0/05^{\circ} \times 0/05^{\circ}$  مقایسه شد.

ابزار ریاضی و به منظور در نظر گرفتن پدیده‌های گوناگون بر میزان اتلاف انرژی جریان، مانند اتلاف ناشی از آشفتگی جریان در محیط دریا و اتلاف انرژی درونی در معادله‌ها وارد می‌شود [۱۰]. در نرم‌افزار میک، لزجت گردابی افقی از سه روش قابل محاسبه است. اول به صورت یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود. دوم از یک فایبل اطلاعات نوع دوم که مقداری را برای هر نقطه از شبکه ارائه می‌دهد. سوم این که تغییرات سرعت بر حسب زمان بر اساس فرمول اسمانگورینسکی<sup>۱۶</sup> محاسبه شود. بنابراین لزجت گردابی افقی از رابطه ۴ محاسبه می‌شود [۱۰].

$$A = C_s^2 l^2 \sqrt{2S_x S_y} \quad (4)$$

که  $A$  لزجت گردابی افقی،  $C_s$  ضریب ثابت،  $l$  مقیاس طول شبکه و  $S_{i,j}$  نرخ تغییر شکل سرعت است که از فرمول ۵ محاسبه می‌شود.

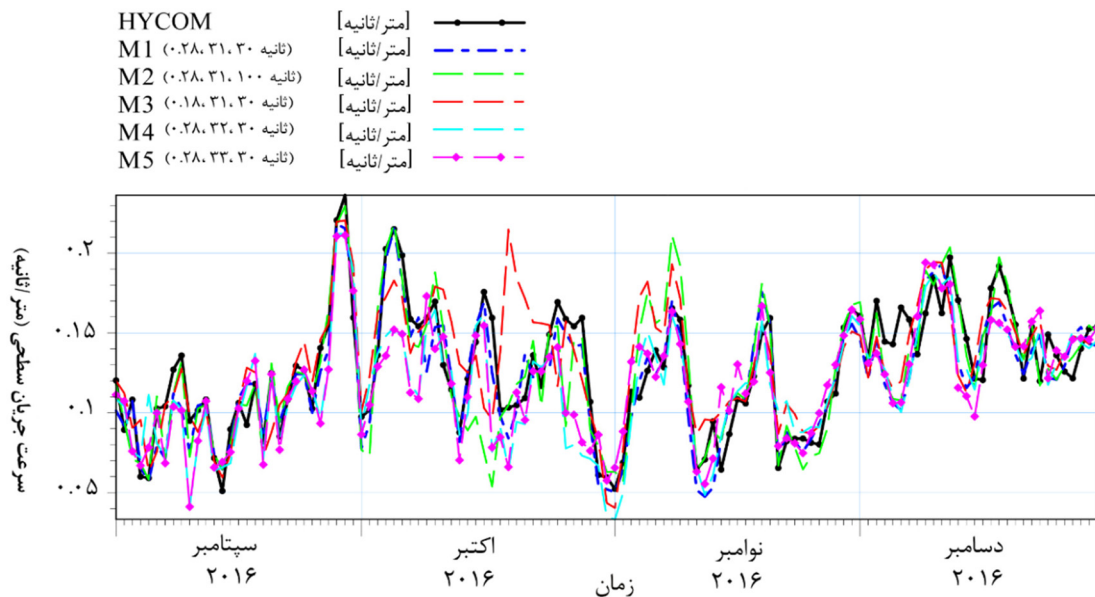
برای بررسی آماری دقت داده‌های محاسبه شده از پارامترهای آماری اریبی<sup>۱۳</sup>، خطای جذر میانگین مربعات<sup>۱۴</sup> و ضریب همبستگی پیرسون<sup>۱۵</sup> استفاده شد (معادله‌های ۱ تا ۳).

$$Bias = \bar{y} - \bar{x} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - x_i)^2} \quad (2)$$

$$CC = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

در رابطه‌های فوق  $\bar{y}$  متوسط سری آماری نتایج اندازه‌گیری شده،  $\bar{x}$  متوسط سری آماری مربوط به مدل،  $x$  سری آماری نتایج مربوط به مدل،  $y$  سری آماری نتایج اندازه‌گیری و  $n$  تعداد کل داده‌ها در سری آماری است. مقادیر این پارامترهای محاسبه شده در جدول ۲ ارائه شده است. پیش‌تر بیان شد برای جلوگیری از ناپایداری مدل و نیز واسنجی مدل از راهکار تغییر در لزجت گردابی (افقی-عمودی) و مقاومت بستر استفاده می‌شود [۱۰]. لزجت گردابی به صورت



شکل ۴. مقایسه سری زمانی سرعت جریان سطحی داده‌های مدل مایک ۳ با هایکام برای نقطه‌ای به موقعیت جغرافیایی  $58^{\circ}E$  و  $25/52^{\circ}N$

در رابطه بالا  $K$  انرژی جنبشی اغتشاش<sup>۱۷</sup> در واحد جرم،  $\varepsilon$  اتلاف انرژی جنبشی اغتشاشی و  $c_{\mu}$  یک ثابت تجربی است. مقاومت بستر به عنوان عامل اثرگذار بر الگوی جریان، به صورت ضریب مانینگ<sup>۱۸</sup> یا ضریب شزی<sup>۱۹</sup> در مدل معرفی می‌شود. این ضریب به صورت یک عدد ثابت برای تمام

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial u_j}{\partial y} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad (5)$$

لزجت گردابی عمودی ناشی از اغتشاش، بر اساس پارامتر  $K$  و  $\varepsilon$  از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$v_t = c_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

قرار گرفت که همان‌طور که در شکل ۳ و جدول ۲ دیده می‌شود، بهترین نتایج را نسبت به سایر اجراها ارائه می‌دهد (M1). همان‌طور که از پارامترهای آماری جدول ۲ دیده می‌شود؛ این اجرا دارای کمترین مقدار خطای جزر میانگین مربعات (RMSE=0.021) و بیشترین ضریب همبستگی (CC=0.85) است. به‌علاوه ضرایب ثابت در تبادل حرارتی با مقدار ۰/۳ برای انرژی جذب‌شده در نزدیکی سطح ( $\beta$ )، ضریب ۱ برای استهلاك نور  $\lambda^1$ ،  $a_1$  و  $b_1$  (ضرایب انتقال سرما و گرما) به‌ترتیب با مقادیر ۰/۳۳ و ۰/۴۴ مقادیری بودند که با توجه به پارامترهای آماری بهترین نتایج را ارائه کردند، بنابراین در شبیه‌سازی نهایی از این مقادیر استفاده شد.

شکل ۵ نمودار پراکندگی پارامتر سرعت جریان را برای شبیه‌سازی بهینه (M1) در مقابل هایکام نشان می‌دهد. مطابق آنچه در نمودار سری زمانی سرعت جریان و پارامترهای آماری نشان داده شد، نمودار پراکندگی نیز بیان‌کننده توافق مناسب میان نتایج مدل مایک و هایکام است.

سطح دامنه محاسباتی یا به‌صورت یک ماتریس دوبعدی در سطح دامنه قابل تعریف است [۱۰].

هر گونه تغییر در ضریب مقاومت بستر، تغییرات قابل‌توجهی را در الگوی جریان و ارتفاع سطح آب حاصل از مدل به وجود می‌آورد؛ بنابراین در این تحقیق، طی اجراهای مختلف استفاده از عدد مانینگ با مقادیر ثابت بهترین گزینه در نظر گرفته شد چراکه در شبیه‌سازی‌ها نتایج قابل‌قبول‌تری نسبت به عدد شزی ارائه نمود.

عدد مانینگ بر اساس ارتفاع زبری از معادله ۷ به دست می‌آید.

$$n = \frac{25.4}{k_s^{1/6}} \quad (7)$$

در معادله (۷)  $n$  معرف عدد مانینگ و  $k_s$  ارتفاع زبری است که برحسب واحد متر بیان می‌شود.

در نهایت مدل با لزجت گردابی افقی بر اساس فرمول اسمانگورینسکی با مقدار ثابت ۰/۲۸، فرمول کا-افسیلون<sup>۲۰</sup> نیز برای لزجت گردابی عمودی و مقاومت بستر به‌صورت عدد مانینگ با مقدار ثابت ۳۱ به‌منظور شبیه‌سازی مورد استفاده

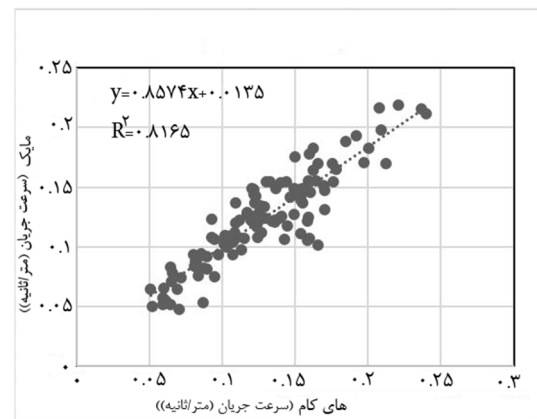
جدول ۲. مقادیر پارامترهای آماری

|                | M1       | M2       | M3       | M4       | M5       |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Time Step      | ۳۰ s     | ۱۰۰ s    | ۳۰ s     | ۳۰ s     | ۳۰ s     |
| Bed Resistance | ۳۱ m     | ۳۱ m     | ۳۱ m     | ۳۲ m     | ۳۳ m     |
| Eddy viscosity | ۰/۲۸     | ۰/۲۸     | ۰/۱۸     | ۰/۲۸     | ۰/۲۸     |
| $\beta$        | ۰/۳      | ۰/۳      | ۰/۲۸     | ۰/۲      | ۰/۳      |
| $\lambda$      | ۱        | ۱/۵      | ۱/۱۲۵    | ۱        | ۱        |
| $a_1$          | ۰/۳۳     | ۰/۳۳۵    | ۰/۳۱۵    | ۰/۴۴     | ۰/۳۳     |
| $b_1$          | ۰/۴۴     | ۰/۴۵۵    | ۰/۵۲۵    | ۰/۵۵     | ۰/۴۴     |
| RMSE           | ۰/۰۲۱۵۳۸ | ۰/۰۲۳۴۹۶ | ۰/۰۲۷۴۴۱ | ۰/۰۲۷۳۰۸ | ۰/۰۲۶۶۱۹ |
| CC             | ۰/۸۵۳۷۷۷ | ۰/۸۴۵۵۳۹ | ۰/۷۳۷۹۱۸ | ۰/۷۷۰۳۸۸ | ۰/۷۶۷۰۳۶ |
| Bias           | ۰/۰۰۷۶۱۴ | ۰/۰۰۱۹۴۱ | -۰/۰۰۴۰۵ | ۰/۰۱۰۵۶  | ۰/۰۸۷۲۷  |

جولای غلظت کلروفیل-a (شکل ۶ ب) در سواحل جاسک بسیار ناچیز است (ستون راست). این شواهد اولیه حاکی از آن است که در دوره مونسون تابستانی شرایط مساعد برای وقوع فراجوشی وجود ندارد. در دوره گذر، طی ماه اکتبر (شکل ۶ الف) بادهای متغیر به دفعات تکرار می‌شوند. در حالی که در قسمت شمال غربی حوضه در امتداد سواحل بندر جاسک بادهای تغییر جهت داده‌اند؛ به نحوی که جهت وزش بادهای به سوی شرق سوق پیدا می‌کنند و به موازات ساحل می‌وزند به گونه‌ای که سواحل جاسک سمت چپ جهت وزش باد قرار گرفته است. در این صورت تنش سطحی ناشی از باد همراه با اثر نیروی کوریولیس سبب حرکت آب به سوی دریا می‌شود که می‌تواند شرایط مناسب برای ایجاد پدیده فراجوشی ساحلی را فراهم کند.

بررسی الگویی دمایی در دوره گذر که با کاهش دمای هوا همراه است نشان می‌دهد که در ماه اکتبر دریای عمان از لحاظ دمایی به سه بخش تقسیم می‌شود: قسمت شرقی به نسبت سرد، قسمت مرکزی به نسبت گرم و قسمت غربی که دارای الگوی دمایی گرم است. این تغییرات می‌تواند به دلیل گردش عمومی دریای عمان باشد که دربرگیرنده آب گرم خلیج فارس از طریق تنگه هرمز در قسمت‌های جنوب شرقی است.

اما در بخش شمال غربی دریای عمان یعنی در امتداد سواحل بندر جاسک با وجود وزش بادهای مناسب، نوار آب سردی دیده می‌شود که رخداد پدیده فراجوشی را نشان می‌دهد (شکل ۶ الف ستون چپ). همچنین افزایش غلظت کلروفیل-a مطابق شکل ۶ ب) در ماه اکتبر به طور محسوسی دیده می‌شود درست در جایی که آنومالی دما ناشی از فراجوشی کاهش یافته است که این وضعیت می‌تواند گواهی دیگری بر وقوع فراجوشی در این منطقه باشد.



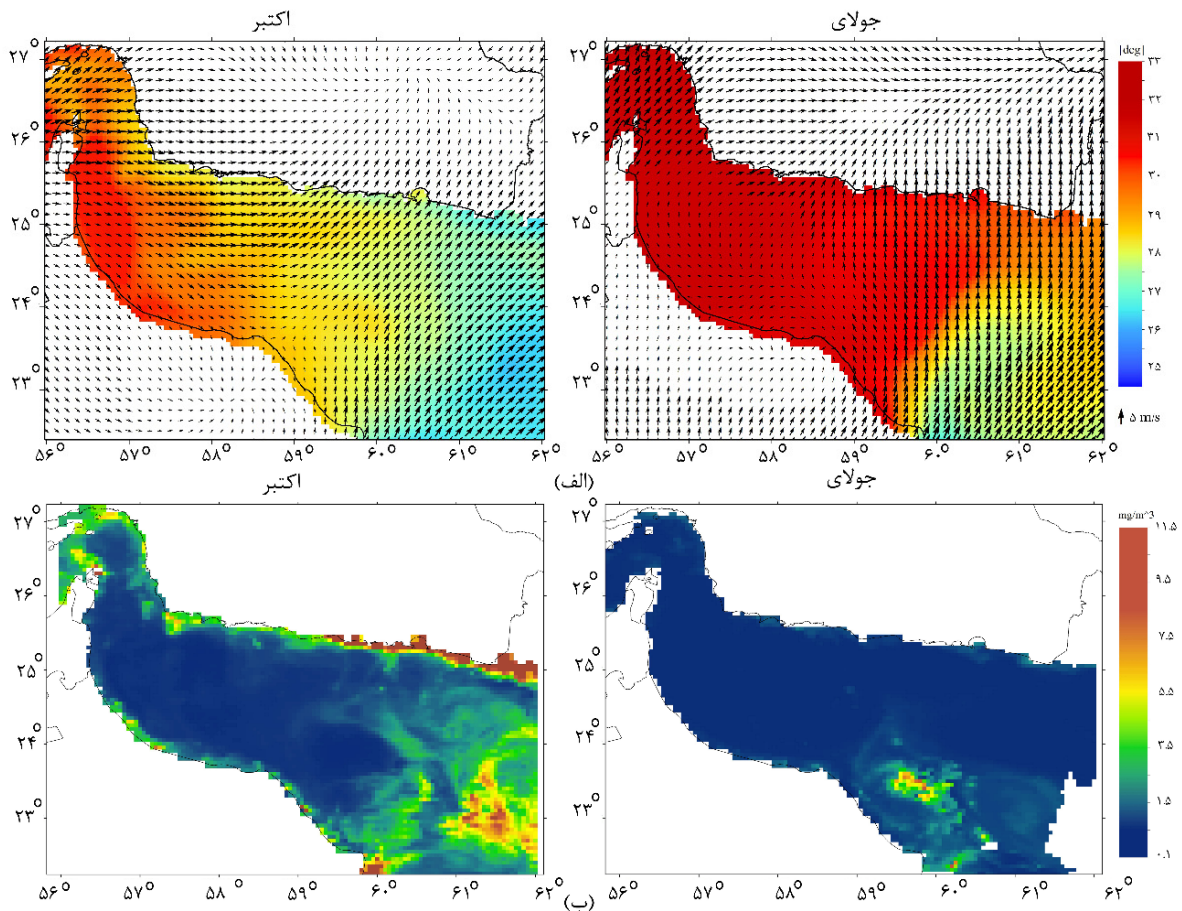
شکل ۵. نمودار پراکنندگی مدل بهینه

#### ۲-۴. روش‌های شناسایی پدیده فراجوشی ساحلی

با توجه به این که بخش جنوب شرقی ایران در امتداد سواحل دریای عمان دارای اقلیم مونسونی است و الگوی گردش آب در این ناحیه را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد [۱۵]، از این رو برای شناسایی وقوع فراجوشی الگوی باد سطحی با دمای سطح دریا و فراوانی غلظت کلروفیل-a در دوره فعالیت مونسون تابستانی (ژوئن-سپتامبر) و مرحله گذر از مونسون (اکتبر-نوامبر) تهیه شده و مورد بررسی قرار گرفت که این نتایج در شکل ۶ اختصاصاً برای ماه‌های جولای و اکتبر آورده شده است و از ارائه نتایج سایر ماه‌ها برای خلاصه‌نویسی صرف نظر شده است.

مطابق شکل ۶ الف) در ماه جولای (ستون راست)، وزش بادهای جنوب غربی در قسمت شمال غربی دریای عمان در امتداد سواحل جاسک از سرعت کمتری نسبت به قسمت شرقی حوضه برخوردارند و عمود بر ساحل می‌وزند. با بررسی الگوی دمایی در فصل تابستان به علت گرمای شدید هوا، میانگین ماهانه دمای سطح دریا در حوضه دریای عمان دارای الگوی دمایی گرم است. به طور نمونه قسمت مرکزی دریای عمان و به خصوص در امتداد سواحل بندر جاسک الگوی دمایی بسیار گرم دیده می‌شود. از طرف دیگر در ماه





شکل ۶. الف) متوسط ماهانه دمای سطح (رنگ پس زمینه) از ماهواره جئوس-پوس، با بردار متوسط ماهانه سرعت باد (فلش های سیاه رنگ)، ب) متوسط ماهانه غلظت کلروفیل-a از ماهواره مودیس-آکوآ طی دوره مونسون تابستانی و مرحله گذر از مونسون در سال ۲۰۱۶

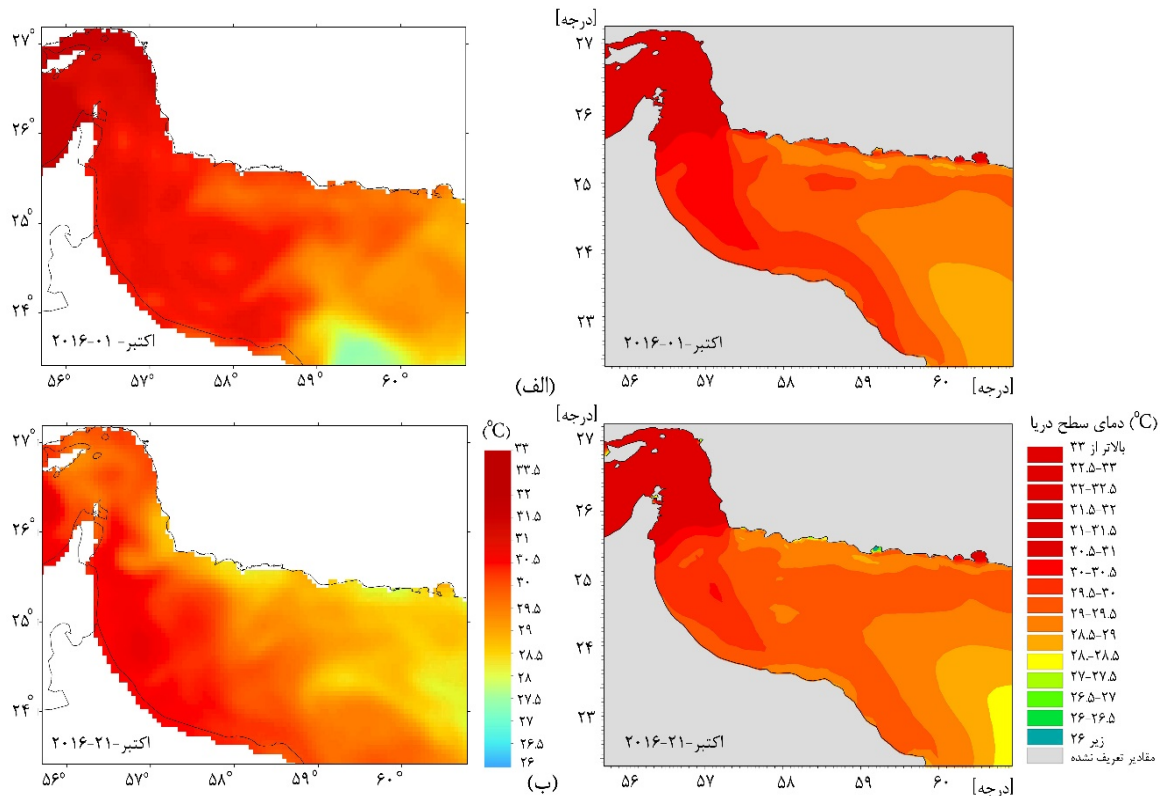
تصاویر دمای سطح دریا حاصل از سنجنده جئوس-پوس با نتایج مدل در ماه اکتبر، نوار آب سرد به موازات خط ساحلی بندر جاسک در هر دو قابل مشاهده است.

این نوار آب سرد در روزهای اولیه ماه اکتبر ظاهر شده، در روز بیست و یکم عرض نوار آب سرد در منطقه ۲۵/۴ تا ۲۵/۸ عرض شمالی افزایش یافته است و تا اواخر اکتبر ادامه دارد. این کاهش دمایی به همراه الگوی باد سطحی (شکل ۶ الف)، و فراوانی غلظت کلروفیل-a (شکل ۶ ب)، تأیید کننده امکان رخداد فراجوشی ساحلی در سواحل جاسک است.

### ۳. بحث و نتایج

#### ۳-۱. دمای سطح دریا

در شکل ۷ امکان وقوع پدیده فراجوشی با توجه به کاهش دمایی در آب های سواحل جاسک با استفاده از نتایج شبیه سازی شده دمای سطح دریا (ستون چپ) و نیز تصاویر ماهواره ای (ستون راست) قابل بررسی است. با توجه به کمتر بودن دمای سطح آب در روزهای اول ماه اکتبر نسبت به روزهای آخر علی رغم این که با توجه به فصل سرد توقع عکس می رود، می توان کمتر بودن دما در اوایل ماه اکتبر را به پدیده فراجوشی نسبت داد. مطابق شکل ۷، در مقایسه



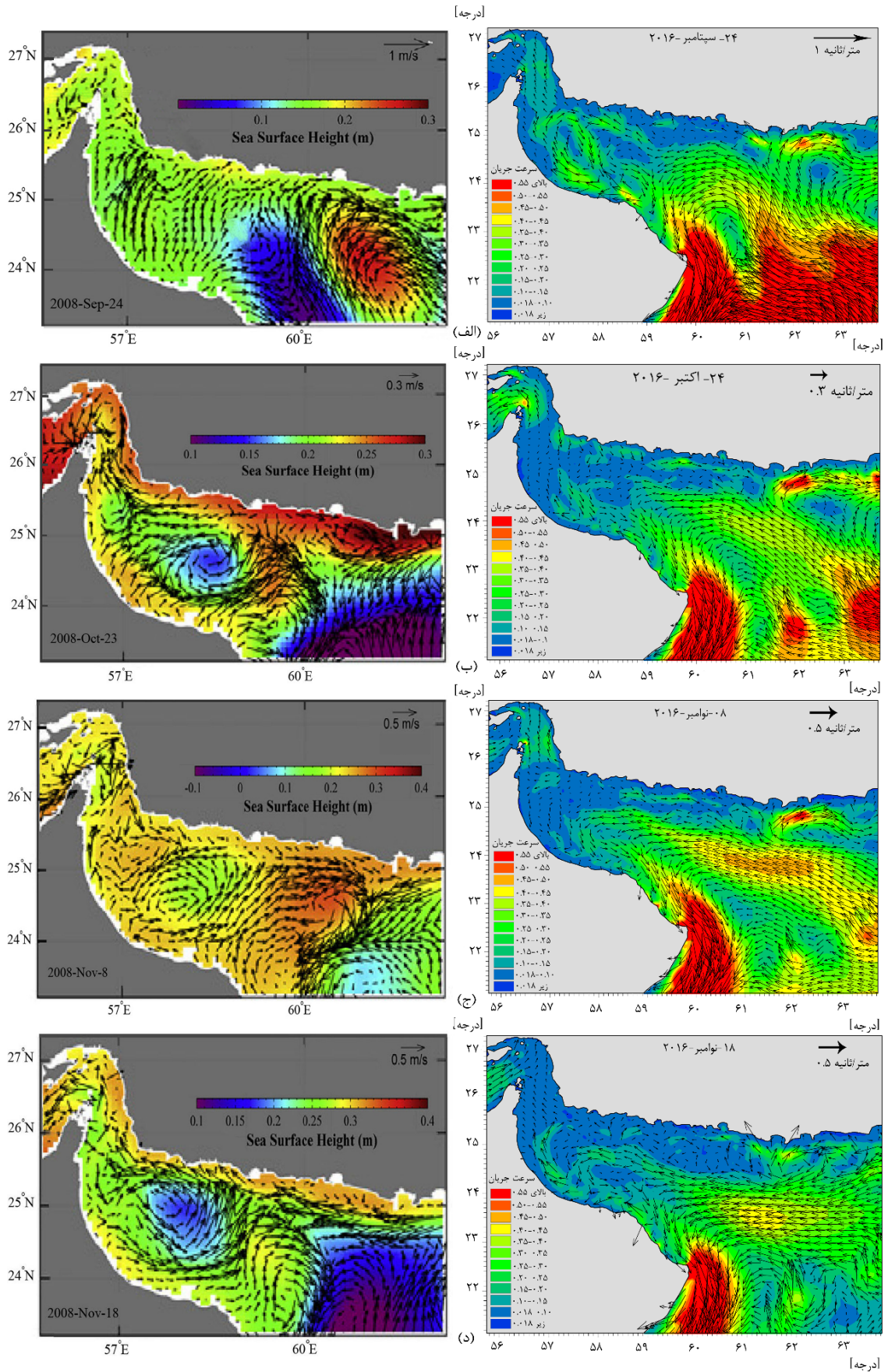
شکل ۷. میدان دمای سطح آب برحسب درجه سانتی گراد (سمت راست: مدل، سمت چپ: تصاویر ماهواره‌ای) به ترتیب از بالا به پایین (الف) برای روز اول و (ب) بیست و یکم اکتبر

چرخه کوچک در خلاف جهت نیز همراه با جریان خروجی خلیج فارس در حوالی این گردش مشاهده می‌شود. در امتداد سواحل بندر جاسک نیز جریانات سطحی به سمت شمال غرب دیده می‌شود. تنها تفاوت قابل ذکر این است که در مدل هایکام گردش‌های حلقوی در مرکز دریای عمان به خوبی قابل مشاهده نیست.

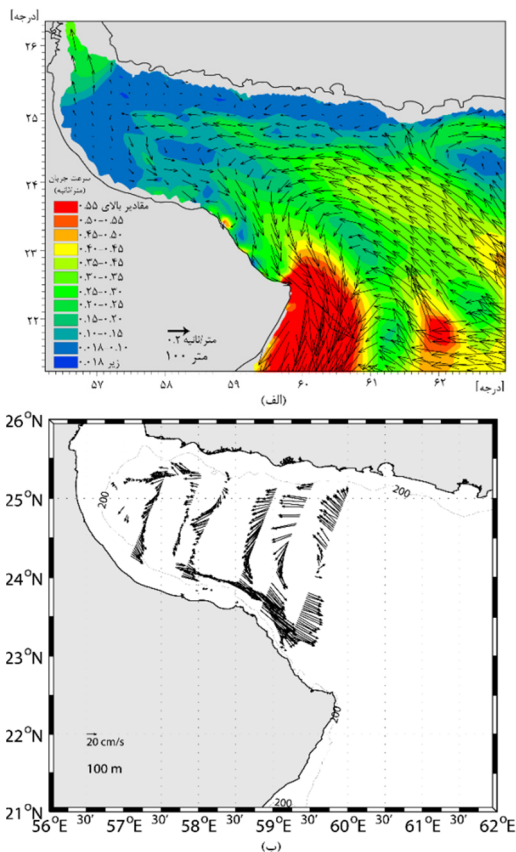
مطابق شکل ۸ ب و ج به ترتیب در ۲۳ اکتبر و ۸ نوامبر نتایج مدل مایک در امتداد سواحل عمانی چرخه سایکلونی ساعتگرد دیده می‌شود که در مجاورت آن در عرض  $25^{\circ}N$  -  $24^{\circ}N$  و طول  $58^{\circ}E$  تا  $60^{\circ}E$  چرخه آنتی سایکلونی در خلاف جهت مشاهده می‌شود که بین این دو گردش محلی در خلاف جهت هم، جریانات سطحی با درانده از سوی سواحل جاسک به سوی دریا دیده می‌شود به طوری که این حرکات جریانات پادساعتگرد در منطقه را تقویت می‌کنند. نتایج هر دو مدل (شکل ۸ ب و ج) جریانات دور از ساحل در امتداد سواحل جاسک در ماه اکتبر تا اوایل نوامبر را بین دو چرخه حلقوی نشان می‌دهد که می‌تواند رخداد فراجوشی ساحلی را تأیید کند.

### ۲-۳. الگوی گردش جریان‌های دریای عمان

به منظور بررسی نحوه گردش آب دریای عمان شکل ۸ تهیه شد. در این شکل الگوی گردش جریان دریای عمان حاصل از نتایج مدل مایک ۳ در مطالعه حاضر (تصاویر سمت راست) با نتایج حاصل از مدل هایکام در مطالعه ژائو و قدیرا [۱۶] (تصاویر سمت چپ) برای ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر با یکدیگر مقایسه شده است. آن‌ها در این مطالعه با استفاده از مدل هایکام و مشاهدات ماهواره‌ای به مطالعه کشند قرمز در خلیج فارس پرداختند. بخشی از نتایج مطالعه آن‌ها که با مطالعه حاضر مرتبط است، در اینجا ارائه شده است که از مهم‌ترین نتایجی که آن‌ها در این تحقیق اشاره کردند شکوفایی و تکامل این پدیده هم‌زمان با وقوع فراجوشی در امتداد سواحل جاسک در ماه اکتبر بود. در شکل (الف) مربوط به روز ۲۴ ماه سپتامبر می‌توان دید که در قسمت شرقی دریای عمان بین عرض‌های  $25^{\circ}N$  -  $24^{\circ}N$  و طول  $62^{\circ}E$  تا  $60^{\circ}E$ ، گردش‌های محلی به صورت چرخه‌های سایکلونی وجود دارد. یک چرخه ساعتگرد بزرگ در بخش مرکزی منطقه بین عرض‌های  $25^{\circ}N$  -  $23^{\circ}N$  و طول  $59^{\circ}E$  تا  $56^{\circ}E$  دیده می‌شود. دو



شکل ۸. مقایسه الگوی گردش محلی و جریانات سطحی دریای عمان حاصل از نتایج مدل مایک (سمت راست در مطالعه حاضر) با هایکام (سمت چپ از مطالعه ژانو و قدیرا [۱۰]) در الف (سپتامبر، ب) اکتبر، د) ابتدای نوامبر و ج) اواخر نوامبر



شکل ۹. مقایسه جریان شبیه‌سازی شده (الف) با مدل مایک با (ب) جریان اندازه‌گیری شده با دستگاه ای‌دی‌سی‌پی در عمق ۱۰۰ متر برای نوامبر ۱- اکتبر ۲۱ [۷].

### ۳-۳. بررسی وقوع فراجوشی ساحلی

شکل ۱۰ جریان‌ات سطحی در امتداد سواحل جاسک در ماه اکتبر و نوامبر را نشان می‌دهد، این جریان‌ات به‌طور عمده به سمت غرب/شمال‌غربی هستند [۷]، اما مطابق شکل ۶ الف، الگوی باد در ماه اکتبر در جهت‌ی است که می‌تواند در سواحل شمال‌غرب دریای عمان آب‌ها را از سمت ساحل به سوی دریا سوق دهد. وزش این بادهای مساعد برای وقوع فراجوشی ساحلی، به واگرایی جریان‌ات سطحی منجر می‌شوند و آب‌ها به سمت راست جهت باد منحرف می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱۰ (الف) مشاهده می‌شود جریان‌ات بادرانده ضعیفی به سوی دریا در روز اول اکتبر، وجود دارد. این جریان‌ات سطحی بادرانده تا روز بیست و یکم (شکل ۱۰ ب) از ساحل به سوی دریا در جهت جنوب/جنوب‌غرب تقویت شده‌اند و تا اواخر اکتبر ادامه دارند اما از سرعت آن‌ها کاسته می‌شود و رفته‌رفته ضعیف‌تر می‌شوند، تا اوایل نوامبر

این مشاهدات با مطالعات پوئس و همکاران [۷] و همچنین رینولدز [۶] مطابقت دارد. اما در نیمه دوم نوامبر (شکل ۸ د)، نتایج هر دو مدل نشان می‌دهد که این جریان‌ات به سوی ساحل جاسک در جهت شمال‌غرب سوق یافته‌اند.

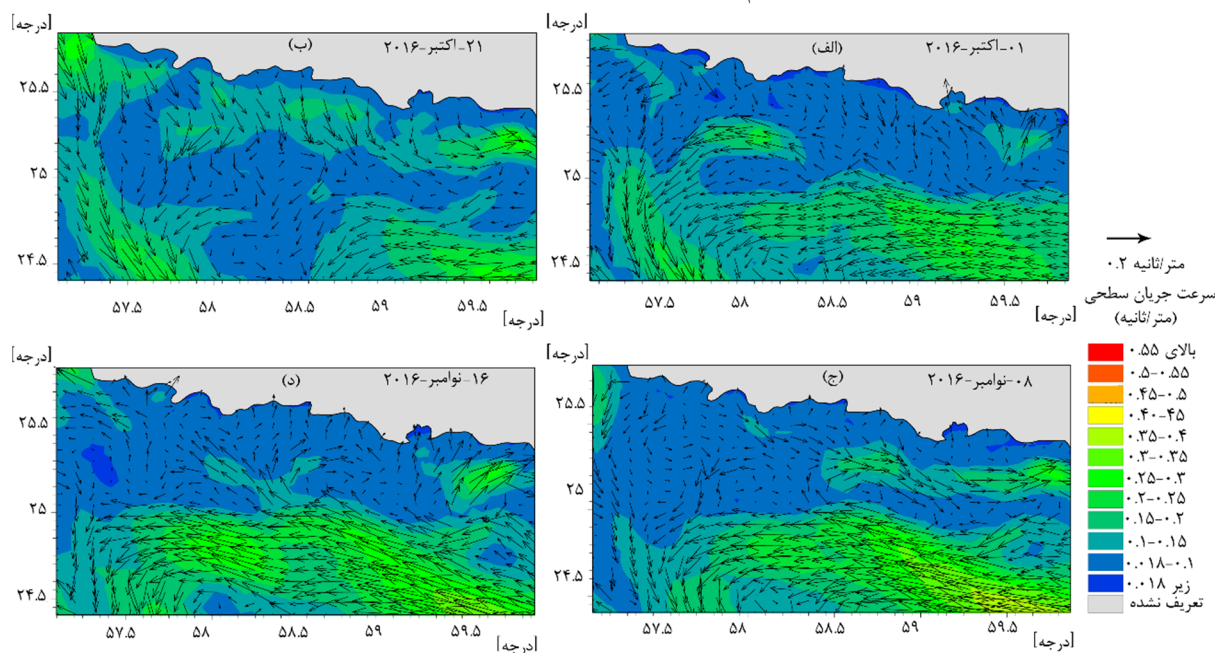
این نکته نیز قابل ذکر است که تغییرات چرخه‌های سایکلونی و آنتی سایکلونی در طول یک ماه بسیار اندک است که نتایج مدل‌سازی گواه این امر بود و همان‌طور که نشان داده شد این گردش‌های محلی در طول سال وجود دارند و شدت و قدرت آن‌ها وابسته به باد است و آنچه که الگوی گردش فصلی دریای عمان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و سبب تغییرات آن‌ها با تغییر فصول می‌شود، تغییرات خصوصیات فیزیکی جریان برون‌ریز خلیج فارس است که به‌مرور زمان می‌تواند الگوی گردش آب دریای عمان را تحت تأثیر خود قرار دهد [۱۷].

همچنین شکل ۹ تشابه سرعت جریان به دست آمده حاصل از مدل حاضر (الف) با نتایج میدانی حاصل از پژوهش پوئس و همکاران [۷] (ب) در عمق ۱۰۰ متری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در عمق ۱۰۰ متری شکل‌گیری چرخه‌های حلقوی که در عملیات میدانی مشاهده شده به خوبی با مدل شبیه‌سازی شده است. به‌ویژه در قسمت شرقی دریای عمان چرخش سایکلونی ساعتگرد کاملاً قابل مشاهده است، در حالی که از سرعت آن در عمق کاسته شده است.

در مرکز دریای عمان در عرض  $25^{\circ}N - 24^{\circ}$  و طول  $58^{\circ}E$  تا  $60^{\circ}E$  چرخه آنتی سایکلونی نیز دیده می‌شود اما اثر چرخه سایکلونی بسیار کم‌رنگ شده است به طوری که جریان‌ها تضعیف شده‌اند که تمامی این شرایط در نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز به خوبی قابل مشاهده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، در امتداد سواحل جاسک بین این دو گردش حلقوی جریان‌ات سطحی بادرانده‌ای از سوی ساحل به سمت دریا وجود دارد که بر اساس نتایج شبیه‌سازی در عمق ۱۰۰ متری نشان می‌دهد که گردش آب در این عمق نیز شبیه آب‌های سطحی است و تنها از قدرت آن‌ها کاسته و ضعیف‌تر شده‌اند.

امتداد سواحل بندر جاسک، به سوی شمال غرب به طرف ساحل هستند. در حقیقت بر اساس نتایج حاصل از شبیه سازی یک ساله این جریانات در طول سال اغلب به سوی ساحل می باشند و فقط در طی ماه اکتبر که با وزش بادهای غربی همراه است وضعیت جریانات سطحی به علت تنش ناشی از مؤلفه غربی باد به سوی دریا تغییر مسیر می دهد که می تواند عامل رخداد پدیده فراجوشی باشد.

این جریانات ضعیف به سوی دریا مشاهده می شوند (شکل ۱۰ ج) و تا زمانی که تداوم وزش بادهای مساعد برای وقوع فراجوشی وجود داشته باشد، این جریانات نیز در امتداد ساحل به سوی دریا سوق خواهند یافت. اما همان طور که گفته شد، وضعیت تداوم و قدرت بادهای در ماه نوامبر تغییر پیدا کرده و این تغییر وضعیت بادهای منجر به حرکت جریانات به سوی شمال غرب (به سمت ساحل) می شود. همچنین در شکل ۱۰ (د) دیده می شود که جریانات در نیمه دوم نوامبر در



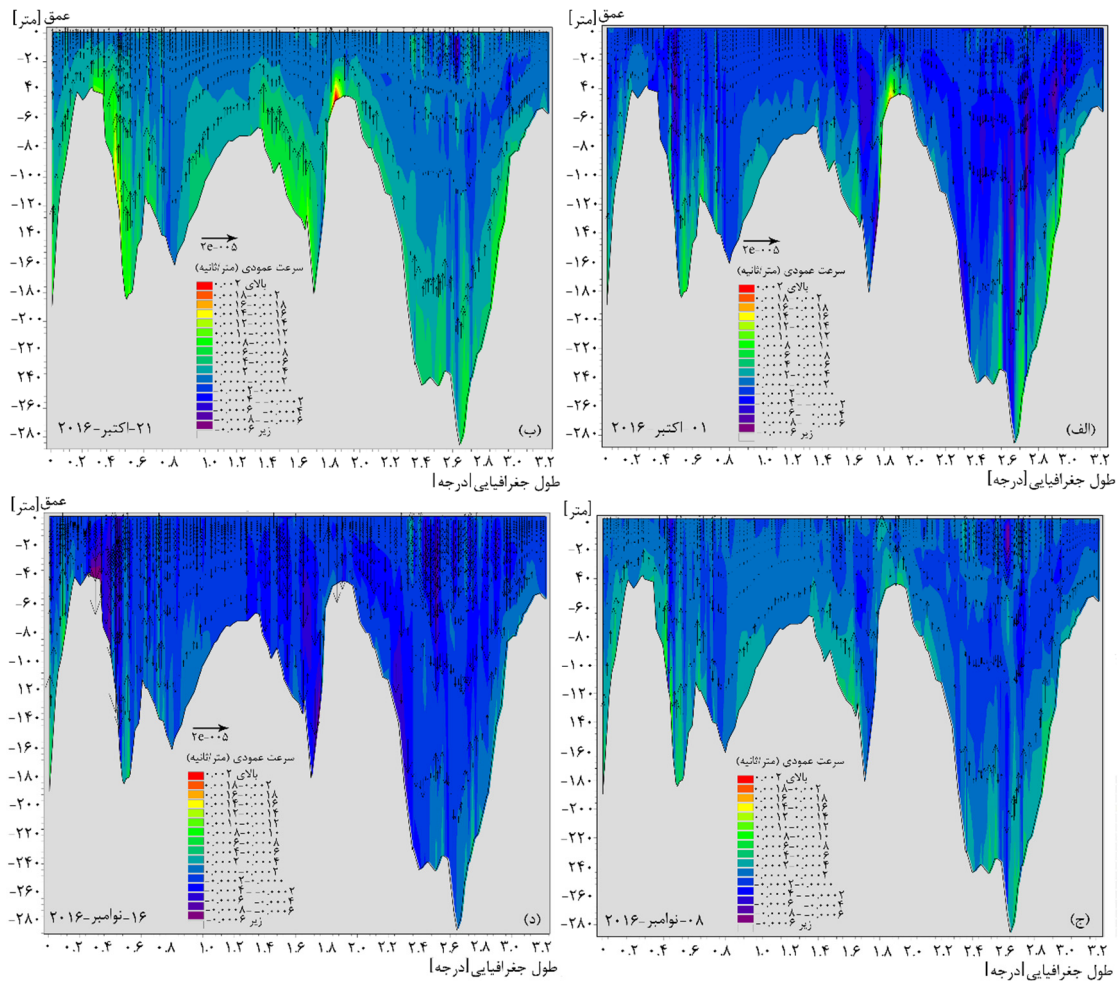
شکل ۱۰. جریانات سطحی در امتداد سواحل جاسک (الف) روز اول، (ب) بیست و یکم اکتبر، (ج) هشتم و (د) شانزدهم نوامبر ۲۰۱۶

یکم مقدار و سرعت این جریانات قائم افزایش می یابد و تقویت می شوند (شکل ۱۱ ب)، اما در اواخر اکتبر و اوایل نوامبر رفته رفته از قدرت و مقدار آنها کاسته می شود (شکل ۱۱ ج) که هم زمان با وزش بادهای غربی (شکل ۶) و تغییر جریانات سطحی (شکل ۱۰) است. حضور این جریانات رو به بالا در طول ماه اکتبر و اوایل نوامبر با مقادیر مثبت مؤید وجود پدیده فراجوشی در این منطقه است. در نیمه دوم نوامبر مطابق شکل (۱۱ د) جریانات قائم دارای مقادیر منفی شده و رو به پایین هستند که نشان از اتمام رخداد فراجوشی دارد. در مطالعات علمی پیشین بیان شده است که برای طوفان هایی با حداکثر سرعت  $10^3$  گره دریایی (معادل ۵۰ متر بر ثانیه)، سرعت قائم فراجوشی از مرتبه  $10^{-3}$  متر بر ثانیه است [۳].

شکل ۱۱ پروفیل قائم سرعت جریان از برش مشخص شده در شکل ۳ (مقطع AB) را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۱۱ الف مشاهده می شود سرعت قائم در روزهای اولیه اکتبر در اعماق بالاتر از ۲۰۰ متری در امتداد سواحل جاسک دارای مقادیر مثبت و به سمت بالاست، که نشان دهنده جریانات بالاسویی است، که هم زمان با وزش بادهای مساعد جریان های سطحی به سوی دریاست که به دنبال آن آب لایه های زیرین برای جبران این واگرایی و حفظ تعادل به سمت بالا حرکت می کنند و موجب ایجاد فراجوشی می شود. این جریانات بالاسو با تداوم بادهای و جریانات سطحی واگرا شده در طول ماه اکتبر ادامه دارند و این روند بر اساس نتایج مدل تا اواخر اکتبر تداوم دارد به نحوی که تا روز بیست و

همان‌طور که در بررسی الگوی باد سطحی در ماه اکتبر (شکل ۶ الف) دیده شد سرعت باد در منطقه جاسک حدود ۵ متر بر ثانیه است، بنابراین سرعت قائم فراجوشی از مرتبه  $10^{-5}$  تا  $10^{-4}$  متر بر ثانیه در منطقه قابل انتظار است که نتایج شبیه‌سازی سرعت جریان قائم گواه این امر بود.

همان‌طور که در بررسی الگوی باد سطحی در ماه اکتبر (شکل ۶ الف) دیده شد سرعت باد در منطقه جاسک حدود ۵ متر بر ثانیه است، بنابراین سرعت قائم فراجوشی از مرتبه  $10^{-5}$  تا  $10^{-4}$  متر بر ثانیه در منطقه قابل انتظار است که نتایج شبیه‌سازی سرعت جریان قائم گواه این امر بود.



شکل ۱۱. جریان های قائم در امتداد خطوط سواحل جاسک در الف) روز اول، ب) بیست و یکم اکتبر، ج) هشتم و د) شانزدهم نوامبر

جاسک، جریانات سطحی بادرانده ایجاد شده که جهت آن از سوی ساحل به طرف دریاست به نحوی که آب‌های سطحی منطقه ساحلی به نواحی دور از ساحل سوق داده شده‌اند. این جریانات و انتقال آب از سمت سواحل جاسک به سوی جنوب باعث ناهماهنگی سطح آب در این دو ناحیه شده است. در نتیجه برای حفظ تعادل، آب‌های زیرسطحی جایگزین آب‌های سطحی شده است و از آن جا که دمای آب در لایه‌های زیرسطحی کمتر از دمای سطح آب است، دمای آب‌های سطحی در سواحل جاسک، به‌طور چشمگیری کمتر از مناطق دور از ساحل است.

#### ۴. نتیجه گیری

الگوی باد غالب، در دوره گذر از مونسون طی ماه اکتبر در دریای عمان به‌خصوص در امتداد سواحل جاسک از طرف غرب/جنوب غرب به شرق/جنوب شرق است (شکل ۶ ب) و این مسئله باعث ایجاد پدیده فراجوشی در سواحل بندر جاسک شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی در این مطالعه، در مرکز دریای عمان گردش حلقوی پاد ساعتگرد همراه با یک جریان خروجی به سوی جنوب شرق در امتداد سواحل عمانی مشاهده شد و در قسمت غربی نیز گردش حلقوی ساعتگرد به سوی تنگه هرمز دیده شد. از سویی دیگر بین این دو گردش محلی در خلاف جهت هم در امتداد سواحل

- Experiment: 2. Gulf of Oman. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2004 Dec 1;109(C12).
- [8] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF [Internet], UK; 1975 [cited 2018 Apr 14]. Available from: <https://apps.ecmwf.int>
- [9] Nixon, R. National Oceanic and Atmospheric Administration [Internet], USA; 1970 October 3 [cited 2018 Apr 10]. Available from: <https://noaa.gov>
- [10] MIKE21 DH. MIKE3 Flow Model, FM Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation. Denmark: DHI water Environ; 2014.
- [11] Marine Institute (Ireland), ERDDAP [Internet], Ireland, 2018 [cited 2018 Sep. 15]. Available from: <https://erddap.marine.ie>
- [12] Nautide, tides4fishing [Internet], USA; 2018 [cited 2018 Jan. 12]. Available from: <https://tides4fishing.com>
- [13] Public administrative state (EPA), Navy Hydrographic and Oceanographic Service (Shom) [Internet], France; 2007 May 11 [cited 2018 Oct. 15]. Available from: <https://maree.shom.fr>
- [14] National Ocean Partnership Program (NOPP), HYCOM [Internet], USA; 2018 [cited 2018 Jan. 8]. Available from: <https://hycom.org/data>
- [15] Chaichitehrani N, Allahdadi MN. Overview of Wind Climatology for Gulf of Oman and Northern Arabian Sea, American Journal of Fluid Dynamics. 2018; 8(1): 1-9.
- [16] Zhao J, Ghadira H. Monitoring red tide with satellite imagery and numerical models: A case study in the Persian Gulf. Marine Pollution Bulletin. 2014 Feb 15;79(1-2):305-13.

[۱۷] عظام معجبتی. شبیه‌سازی عددی جریان‌های ترموهالینی خلیج فارس با استفاده از یک مدل سه‌بعدی [رساله دکتری]. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات؛ ۱۳۸۹.

### پی‌نوشت

1. Acoustic Doppler Current Profiler
2. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
3. GEOS-POES
4. MODIS-Aqua
5. National Oceanic and Atmospheric Administration

سرعت قائم در سواحل جاسک در ماه‌های اکتبر و نوامبر، دارای مقادیر مثبت است که به معنای سرعت به‌سوی بالا (سطح آب) است. سرعت‌های قائم از نظر مقدار و وسعت در ماه اکتبر قوی‌تر از ماه نوامبر بوده است، به‌نحوی که اندازه سرعت جریانات قائم تا روز بیست و یکم اکتبر تقویت شده‌اند و تا اواخر اکتبر و اوایل نوامبر دیده می‌شوند اما بسیار ضعیف شده‌اند که نشان‌دهنده ضعیف‌تر شدن این پدیده است. در نیمه دوم نوامبر سرعت قائم دارای مقادیر منفی و رو به پایین است که به معنای اتمام فراجوشی است.

پدیده فراجوشی در این منطقه از اعماق حدود ۲۰۰ متری رخ داده است و از آن جا که این پدیده در ناحیه‌ای رخ داده است که دو گردش حلقوی در خلاف جهت هم وجود دارد و با توجه به سرعت باد به نسبت پایین به نظر می‌رسد که باد به تنهایی سبب وقوع فراجوشی ساحلی در این اعماق نشود، بلکه استنباط می‌شود که فراجوشی ساحلی ایجاد شده در سواحل جاسک علاوه بر نقش باد می‌تواند ناشی از اختلاف چگالی و گرده‌های حلقوی موجود و توپوگرافی بستر باشد.

### مراجع

- [1] Brown E, Colling A, Park D, Phillips J, Rothery D, Wright J. Ocean Circulation. 2<sup>nd</sup> ed. Boston Johannesburg: Jointly published by the Open University; 2004. p.64.
- [2] Kampf J, Chapman P. Upwelling Systems of The World. Springer International Publishing Switzerland; 2016. p.31-42
- [3] Knauss JA. Introduction to physical oceanography. 2<sup>nd</sup> ed. Prentice-Hall International, Inc; 2005. p.127.
- [4] Weisberg RH, Black BD, Li Z. An upwelling case study on Florida's west coast. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2000 May 15;105(C5):11459-69.
- [5] Thompson R. Oceanography of the British Columbia coast. Canada: Department of fisheries and Oceans; 1981. p.79-80.
- [6] Reynolds RM. Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition. Marine Pollution Bulletin. 1993 Jan 1;27:35-59.
- [7] Pous SP, Carton X, Lazure P. Hydrology and circulation in the Strait of Hormuz and the Gulf of Oman—Results from the GOGP99

14. Root Mean Square Error
15. Correlation Coefficient
16. Smagorinsky formulation
17. Turbulent kinetic energy
18. Manning
19. Chezy
20. k-epsilon
21. Light extinction coefficient
6. Arcmap
7. ArcGIS
8. Multidimensions Tools
9. Hybrid Coordinate Ocean Model
10. MIKE3 Flow Model FM
11. ETOPO1
12. ERDDAP
13. Bias