



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Investigation of High-risk Zones in Anzali Coasts Associated with Rip Currents Using Field Measurement and Coupled Wave-current Numerical Model (ROMS-SWAN)

Mahmood Reza Akbarpour Jannat^{1,*}, Majid Noranian Esfahani²

¹ Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Marine Engineering and Technology Research Center, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science (INIOAS); Tehran, Iran

² PhD in Marine and Oceanic Sciences (Marine Physics), Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science (INIOAS); Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2020/11/17

Revised: 2020/12/22

Accepted: 2021/02/25

Keywords:

Rip Current

Numerical Modeling

Field Measurement

Drifter

Surface Flow

*Corresponding author:

✉ akbarpour@inio.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objectives: Global Positioning Systems (GPS) and General Packet Radio Service (GPRS) make it possible to track surface currents at a low cost. In this paper, the details of the design and construction of an online self-recorder system to measure the lagrangian currents in the swash zone and compare it with numerical modeling results are presented. Comparing the results of the measurement device with field measurements of coastal currents shows that this drifter has good accuracy for tracking coastal currents. Although there are problems with internal shelf flows in transmitting data collected from the GPRS system, offline capability helps maintain data. Surface current measurement data were tracked off the coast of Anzali, southwest of the Caspian Sea, and several rip current cells were identified. Simultaneously, the currents simulated by the coupling of ROMS ocean models and SWAN waves showed the presence of several cells with relatively weak rip currents (less than 0.8 m/s) in the region, which is in good agreement with the information of interception drifters.

Methods: The present paper aims to present the general design of shallow water drifter for online measurement of surface current velocities including coastal and rip currents. The present study tries to evaluate the performance of shallow water drifters and use it to investigate the characteristics of rip currents in similarity to numerical models. In the second section, the physical details of the drifter design, the numerical model, the network configuration, and the induction forces are presented. In the third section, the results of flow modeling are compared with field measurements performed in the coastal swash zone of the eastern part of Bandar Anzali located in Gilan province, and joint processes are discussed.

Findings: The coastal currents caused by the waves in the coastal swash zone on the east coast of Anzali were studied. Rip currents are formed approximately 60-100 meters apart almost all along the coast. These currents are not very strong and have a speed of less than one meter.

Conclusion: Flow modeling in the coastal area indicates the existence of several rip current cells that the path intercepted by drifters has also confirmed their existence. Although these currents are not so strong, they can be detected at distances between 30 and 60 meters. Most of these rip currents have offshore direction and have been less affected by coastal currents. Hence, the path of the drifters indicates that under normal wind conditions from the northwest, the surface currents are pushed to the east and rotate due to the shoreline. Under east wind conditions, surface currents develop primarily from east to west.



NUMBER OF TABLES

2



NUMBER OF FIGURES

8



NUMBER OF REFERENCES

25

مقاله پژوهشی

بررسی نقاط پر خطر ناشی از جریان‌های شکافنده در سواحل انزلی با استفاده از اندازه‌گیری میدانی و مدل جفت شده موج - جریان (ROMS-SWAN)

محمودرضا اکبرپور جنت^{۱*}، مجید نورانیان اصفهانی^۲^۱ عضو هیأت علمی و رئیس پژوهشکده فناوری و مهندسی دریا، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران^۲ دکترای علوم دریایی و اقیانوسی (فیزیک دریا)، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۲۷/۸/۱۳۹۹ تاریخ بازبینی: ۲/۱۰/۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۷/۱۲/۱۳۹۹	پیشینه و اهداف: سیستم‌های موقعیت‌یابی جهانی (GPS) و سرویس بسته امواج رادیویی (GPRS) امکان رهگیری جریان‌های سطحی را با هزینه اندک فراهم می‌کند. در این مقاله جزییات طراحی و ساخت یک سیستم دريفتر آنلاين - خودثبات (self-recorder) جهت اندازه‌گیری لاگراژمی جریان‌های سطحی در منطقه خیزاب موج و مقایسه آن با نتایج مدل‌سازی عددی ارائه شده است. مقایسه نتایج دستگاه با اندازه‌گیری میدانی جریان‌های ساحلی نشان می‌دهد این دريفتر از دقت مناسبی برای رهگیری جریان‌های ساحلی برخوردار است. هرچند برای جریان‌های نواحی داخلی فلات (inner shelf) در انتقال داده‌های جمع‌آوری شده از سیستم GPRS مشکلاتی وجود دارد اما قابلیت آفلاین به حفظ داده کمک می‌کند. رهگیری داده‌های اندازه‌گیری جریان‌های سطحی در سواحل انزلی واقع در جنوب غربی دریای خزر انجام شد و چندین سلول جریان شکافنده تشخیص داده شد. به‌طور همزمان جریان‌های شبیه‌سازی شده به‌وسیله کولپینگ مدل‌های اقیانوسی ROMS و امواج SWAN وجود چندین سلول با جریان‌های شکافنده نسبتاً ضعیف (کمتر از ۰٫۸ متر بر ثانیه) را در منطقه نشان داد که با اطلاعات دريفترهای رهگیری همخوانی خوبی دارد.
واژگان کلیدی: جریان شکافنده مدلسازی عددی اندازه‌گیری میدانی دريفتر جریان سطحی	روش‌ها: مقاله حاضر، با هدف کلیات طراحی دريفتر آب کم‌عمق برای اندازه‌گیری آنلاين سرعت جریان‌های سطحی شامل جریان‌های کرانه‌ای و جریان‌های شکافنده ارائه می‌شود. تحقیق حاضر سعی دارد عملکرد دريفتر آب کم‌عمق را ارزیابی کرده و با استفاده از آن ویژگی‌های جریان‌های کرانه‌ای و شکافنده را در مشابهت با مدل‌های عددی بررسی نماید. در بخش دوم، جزییات فیزیکی طراحی دريفتر، مدل عددی، پیکربندی شبکه‌ها و نیروهای واداشت ارائه می‌شوند. در بخش سوم، نتایج مدل‌سازی جریان با اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده در منطقه خیزاب ساحلی بخش شرقی بندر انزلی واقع در استان گیلان مقایسه شده و فرآیندهای مشترک مورد بحث قرار گرفته می‌گیرد.
یافته‌ها: جریان‌های ساحلی حاصل از امواج در بخش خیزاب ساحلی در سواحل شرقی انزلی مورد بررسی قرار گرفت. جریان‌های شکافنده به فاصله‌های تقریبی ۱۰۰-۶۰ متر از هم تقریباً در تمامی امتداد ساحل شکل گرفته‌اند. این جریان‌ها چندان قوی نیستند و از سرعتی کمتر از یک متر بر خوردار بوده‌اند.	نتیجه‌گیری: مدل‌سازی جریان در آب‌های ساحلی منطقه وجود چندین سلول جریان شکافنده دلالت دارد که مسیر رهگیری شده توسط دريفترها نیز وجود آنها را تایید کرده است. این جریان‌ها هرچند آنقدر قوی نیستند اما در فواصل بین ۳۰ تا ۶۰ متر قابل تشخیص بوده‌اند. عمده این جریان‌های شکافنده دریاسو بوده‌اند و کمتر تحت تأثیر جریان‌های کرانه‌ای بوده‌اند. از این‌رو، مسیر دريفترها نشان می‌دهد که در شرایط معمولی وزش باد از شمال غربی، جریان‌های سطح به سمت شرق رانده می‌شوند و به دلیل وجود خط ساحلی می‌چرخند. در شرایط باد شرقی، جریان‌های سطح در درجه اول از شرق به غرب توسعه می‌یابند.

*نویسنده مسئول

✉ akbarpour@inio.ac.ir

مقدمه

منطقه خیزاب ساحلی، با استفاده از اجسام شناور و رنگ انجام می‌شود. اندازه‌گیری‌های میدانی هم با استفاده از آرایه‌ای از جریان‌سنج‌های مغناطیسی و یا آکوستیکی انجام می‌پذیرد [۷، ۸]. اخیراً از دریفترهایی برخوردار از ردیاب‌های GPS در رهگیری جریان‌های ساحلی استفاده شده است.

استفاده از دریفترهای ارزان قیمت در پروژه‌های ساحلی درحال توسعه است. این دریفترها، معمولاً از یک بدنه استوانه‌ای حاوی تجهیزات GPS، یک دیسک کنترل‌کننده نوسانات قائم در بخش پایینی، و یک آنتن داخلی یا خارجی تشکیل شده‌اند. دو نوع دریفتر برای تعیین جریان سطحی توسعه داده شده‌اند، یکی با عمق عملیاتی تا ۱۵ متر [۹] و دیگری با عمق عملیاتی کمتر از یک متر زیر سطح آزاد آب [۱۰]. که به ترتیب دریفتر زیرسطحی و دریفتر سطحی نامیده می‌شوند. ساده‌ترین راه برای تعیین موقعیت دریفترها، استفاده از سیستم موقعیت‌یابی ماهواره‌ای GPS است. اطلاعات رهگیری شده از موقعیت دریفتر، یا به‌صورت آفلاین در یک لاگر ذخیره و پس از عملیات بازیابی می‌شود [۱۱، ۱۲] و یا به‌صورت آنلاین توسط سیستم تلفن موبایل در شبکه مخابراتی یا ماهواره‌ای به ایستگاه زمینی مخابره می‌شود [۱۳، ۱۴]. فرآیند تعیین سرعت این دریفترها بسیار ساده و مبتنی بر ساده‌ترین رابطه مکانیک نیوتنی است.

Johnson و همکاران [۱۵] از یک دریفتر پیمایشی کم هزینه با استفاده از یک GPS و بدون قابلیت انتقال داده، برای اندازه‌گیری جریان‌های میانگین زیرسطحی بین اعماق ۲٫۵ تا ۸٫۵ متر استفاده کردند. دستگاه یک بخش زیرسطحی به مساحت ۴۰ سانتیمتر مربع و یک بخش بیرون از آب به مساحت ۴۸ سانتیمتر مربع داشت. Schmidt و همکاران [۱۴] جریان‌های ناحیه خیزاب موج در آب‌های جزرومدی با عمق ۱ تا ۲ متر را با استفاده از ردیابی GPS و تعیین جابجایی آن اندازه‌گیری نموده و نتایج جریان‌های مدلسازی شده را با آنها مقایسه کردند. دریفتر طراحی شده توسط آنها از یک GPS، یک آنتن خارجی، یک فرستنده-گیرنده RF و یک رکورد دیجیتال که همگی در یک محفظه ۵۰ سانتیمتری استوانه‌ای بدون پره قرار داده شده‌اند، تشکیل شده است. MacMahan و همکاران [۱۶] در تلاشی دیگر، دریفتری کم هزینه مجهز به GPS، بدون قابلیت انتقال داده و دارای عمق غوطه‌وری ۰٫۴۰ متر با آنتنی بیرون از آب به ارتفاع ۰٫۷ متر استفاده کردند. Kouts و همکاران [۱۱] دریفتری کم هزینه، مجهز به GPS و ارتباطات GPRS، با قطر ۱۱،۱ m و طول ۱ متر را به‌کار بردند. Sabet و Barani [۱۷] با استفاده از یک دستگاه GPS دستی و باتری که در یک محفظه ۴۰ سانتیمتری استوانه‌ای بدون پره قرار داده شده‌اند، به رهگیری جریان‌های ساحلی پرداختند. این دریفتر، موقعیت مکانی را به‌صورت آفلاین در GPS ذخیره می‌کرد. Armenio و Nasello [۱۳] یک دریفتر کوچک و سطحی را برای اندازه‌گیری جریان در آب‌های کم‌عمق (متر ۰٫۵ <) طراحی و

جریان‌های کرانه‌ای و شکافنده، امواج دوراً و اجسام زیرسطحی به‌عنوان دلایل اصلی تلفات شنای ساحلی بر شمرده می‌شوند [۱]. در این بین، شناسایی جریان‌های شکافنده به دلیل تلفات انسانی ناشی از آنها، از جمله مهم‌ترین مسایل مدیریتی در شهرهای سواحل جنوبی دریای خزر است. به‌طور مشخص بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ بالغ بر چهار هزار و ۳۵۰ نفر در این سواحل درهنگام شنا جان باخته‌اند [۲]. تعیین موقعیت شکل‌گیری و مسیر جریان‌های شکافنده، به سبب تغییرات زمانی و مکانی با استفاده از روش‌های عددی در مقیاس وسیع انجام می‌شود. به دلیل محدودیت‌های عمقی در استفاده از انواع اویلری جریان‌سنج، ارزیابی نتایج مدلسازی با استفاده از داده‌های ثبت شده توسط انواع دریفتر انجام می‌گیرد. بهینه‌سازی این دریفترها که معمولاً به‌صورت محلی طراحی و ساخته می‌شوند، مورد توجه محققان است. همسان‌سازی اینرسی دریفتر با توده آب، تأثیر میدان باد بر حرکت دریفتر، ارتفاع دریفتر به نماینده عمق جریان، تکنیک بازیابی اطلاعات از مهم‌ترین مسایل در طراحی دریفتر به شمار می‌آیند.

تغییرات کرانه‌ای گرادبان تنش‌های تشعشی حاصل از اختلاف در انتقال امواج در امتداد ساحل است. تولید جریان‌های شکافنده مبتنی بر تغییرات کرانه‌ای خیزاب موج است. مکانیزم این تغییرات ممکن است به علت تغییر توپوگرافی [۳]، تغییر مکانی میدان امواج ورودی به علت گروه‌های موج [۴]، عامل میدان موج ورودی و جریان میانگین موج متوسط [۵]، و اندرکنش میدان موج ورودی با امواج کم فرکانس مانند امواج لبه‌ای [۶] باشند. به این ترتیب جریان‌های شکافنده را می‌توان به دو نوع کلی پایدار و گذرا تقسیم‌بندی کرد. بررسی میدانی جریان‌های شکافنده به دلیل طبیعت خطرناک و تغییر مکان آنها یکی از سخت‌ترین سنجش‌ها است. از نقطه‌نظر تکنیکی، پیکربندی میدانی ابزارهای ثابت اندازه‌گیری جریان‌های شکافنده مبتنی بر تجهیزات و البته دشوار است و از این‌رو، درک ضعیفی از میدان سرعت آنها به‌دست آمده است. بیشتر مشاهدات میدانی از جریان‌های شکافنده با مطالعه مورفولوژی ساحلی همراه شده‌اند. مورفولوژی جریان شکافنده معمولاً از یک کانال کم‌عمق به موازات خط ساحلی تشکیل شده که به تدریج به یک کانال شکافنده عمیق‌تر و تقریباً عمود بر ساحل تغییر راستا می‌دهد. در طی دهه‌های گذشته، مشاهدات میدانی بسیاری پیرامون موضوع جریان‌های شکافنده انجام شده است که درک مهندسان از این سیستم‌ها را افزایش داده است. این مشاهدات مبتنی بر اندازه‌گیری سرعت جریان در داخل و همسایگی کانال شکافنده، برداشت‌های دقیق ژرفاسنجی بستر و اندازه‌گیری مشخصات امواج هستند. البته انجام همزمان هر سه نوع اندازه‌گیری، مشکلات قابل ملاحظه‌ای را به همراه خود دارد. معمولاً مشاهدات میدانی بصری از جریان‌های شکافنده در داخل

دیتالاگر مدل Arduino استفاده شده است. بخش دیتالاگر، به موازات GPRS، داده را بر روی یک حافظه از نوع microSD برای مقاصد آفلاین ذخیره می‌کند. با توجه به کاربرد ساحلی دریفت، فرکانس برداشت اطلاعات مکانی توسط واحد GPS برابر یک هرتز تنظیم شده است. تمامی این تجهیزات به همراه منبع تغذیه ۱۲ ولتی و وزنه بالانس در یک محفظه استوانه‌ای با سه باله متقارن در اطراف آن قرار داده شده است. در یک جریان ایده‌آل و بدون برش، حرکات رانشی دستگاه و آب با هم برابر خواهند بود. به همراه سرعت برش عمودی، سرعت دریفت برابر متوسط سرعت آب در طول بدنه دریفت است. قطر و ارتفاع این محفظه استوانه‌ای که از جنس PVC است به ترتیب برابر ۱۱ سانتیمتر و ۵۲ سانتیمتر می‌باشد. در پایین محفظه دیسکی به قطر ۳۰ سانتیمتر قرار داده شده که به‌عنوان یک دمپر وظیفه تعدیل حرکات قائم دریفت در هنگام مواجهه با امواج را دارد.

آبخور دریفت در آب دریای خزر با شوری متوسط ۱۲ گرم در لیتر، تقریباً ۵۰ سانتی متر است (شکل ۱). عملکرد دریفت طی یک عملیات میدانی در سواحل نوشهر واقع بخش مرکزی سواحل جنوبی دریای خزر، با استفاده از جریان‌های ثابت شده توسط دو دستگاه جریان‌سنج RCM9 که در فاصله حدوداً ۱۰۰ متری خط ساحلی و به فاصله ۱۰۰ متر از یکدیگر در عمق‌های ۱ و ۱٫۵ متر نصب شده بودند، ارزیابی شد (شکل ۲، جدول ۱).

این جریان‌سنج‌ها در هر یک دقیقه یک بار اطلاعات جهتی سرعت جریان را اندازه‌گیری و ثبت کرده‌اند. شیب خط نزدیک به عدد یک مبین وجود یک ارتباط خطی بین مقادیر سرعت محاسبه شده توسط دریفت با مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر توسط جریان‌سنج است. مقادیر بسیار کوچک و منفی خطا دلالت بر اندازه‌گیری تقریباً دقیق اما پایین دست دستگاه دریفت دارد. مقادیر خطای جذر میانگین مربعات و شاخص پراکنش به ترتیب 0.31 و 0.05 m/s برای سرعت موازی ساحل و 0.26 و 0.06 m/s برای سرعت عمود بر ساحل دیده می‌شود که به انطباق نسبتاً خوب بین مقادیر دریفت و جریان‌سنج اشاره دارد.

جدول ۱: پارامترهای آماری حاصل از مقایسه مولفه‌های کرانه‌ای و عمود بر ساحل سرعت

دریفت و سرعت‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه‌های RCM9

Table 1: Statistical parameters obtained from comparison of coastal and perpendicular components of drift speed and velocities measured by RCM9 devices

	خطای ریشه	خطای		ضریب همبستگی	
		میانگین	میانگین		
	مربعیات	میانگین	شاخص پراکنندگی	(r)	
	RMSE (m/s)	(MBE) (m/s)	(SI)		
Full range	Long-shore	-0.03	0.05	0.31	0.95
	Cross-shore	-0.04	0.06	0.26	0.93
0.3 m/s<	Longshore	-0.07	0.11	0.39	0.64
	Cross-shore	-0.10	0.08	0.29	0.75

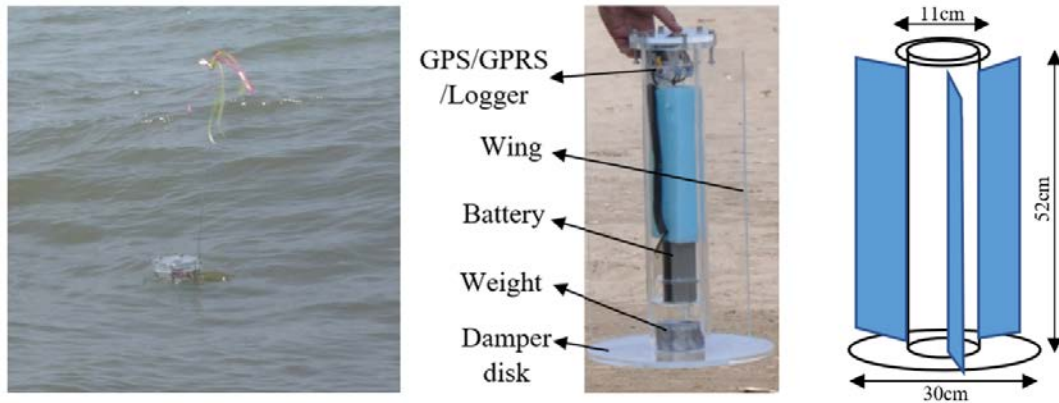
استفاده کردند و علاوه بر ارزیابی تأثیر باد بر حرکت دریفت، نتایج را با مدل عددی مقایسه کردند. این دریفت از یک محفظه استوانه‌ای به ارتفاع ۲۱ سانتیمتر و قطر ۳۰ سانتیمتر شامل GPS، آنتن، لاگر، مودم GSM و باتری تشکیل شده که با فرکانس ۱۲۵ هرتز اطلاعات مکانی را برداشت و ارسال می‌کند. صرف‌نظر از ساختار هندسی بدنه دریفت، خطای این دریفت‌ها به خطای GPS بستگی داشت به‌طوری که در صورت وجود امواج در حدود ۲۰٪ یا در آب‌های آرام کمتر از ۱۰٪ به آن می‌افزود. از نقطه‌نظر طراحی مهندسی، دریفت‌های مورد استفاده در تجربیات مذکور، در مشخصه‌هایی همچون عمق عملیاتی، شناوری، تکنیک ثبت و انتقال داده و اینرسی تفاوت داشته‌اند.

مقاله حاضر، با هدف کلیات طراحی دریفت آب کم‌عمق برای اندازه‌گیری آنلاین سرعت جریان‌های سطحی شامل جریان‌های کرانه‌ای و جریان‌های شکافنده ارائه می‌شود. تحقیق حاضر سعی دارد عملکرد دریفت آب کم‌عمق را ارزیابی کرده و با استفاده از آن ویژگی‌های جریان‌های کرانه‌ای و شکافنده را در مشابهت با مدل‌های عددی بررسی نماید. در بخش دوم، جزئیات فیزیکی طراحی دریفت، مدل عددی، پیکربندی شبکه‌ها و نیروهای واداشت ارائه می‌شوند. در بخش سوم، نتایج مدلسازی جریان با اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده در منطقه خیزاب ساحلی بخش شرقی بندر انزلی واقع در استان گیلان مقایسه شده و فرآیندهای مشترک مورد بحث قرار گرفته می‌گیرد. در پایان، جمع‌بندی نتایج ارائه می‌شود.

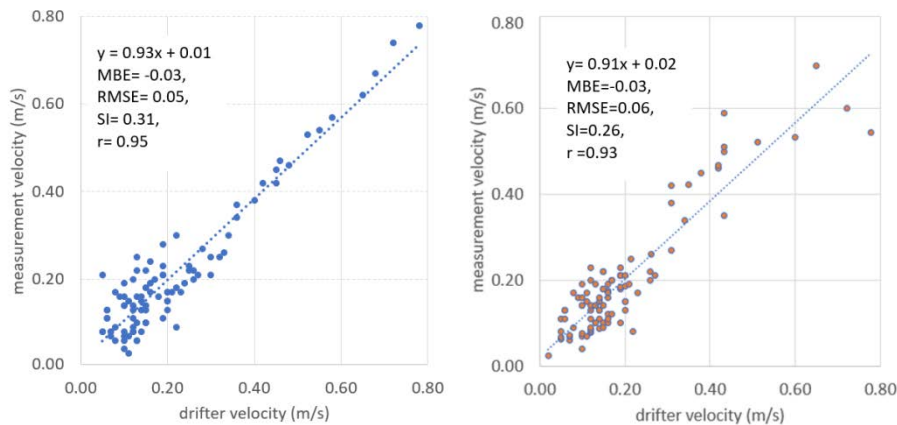
روش پژوهش

۱. جزئیات نمونه اولیه دریفت

برای رهگیری لاگرانژی جریان‌ات لایه سطحی، دریفتی سبک و کارآمد طراحی و ساخته شده است. این دریفت از یک واحد GPS غیر دایفرانسیلی، یک واحد لاگر (جهت ثبت آفلاین اطلاعات) و یک واحد فرستنده موبایل GPRS (جهت ارسال آنلاین اطلاعات) تشکیل شده است. واحد GPS، یک ماژول LEA-5 از سری ماژول‌های u-blox [۱] با کارایی بالا، عملکرد عالی، انعطاف‌پذیر و اقتصادی است. این ماژول از یک هسته ۳۲ کاناله برای دریافت اطلاعات ۱۶ ماهواره با حساسیت ردیابی -160 dBm بهره می‌برد که توام با قابلیت KickStart، امکان دستیابی سریع به سیگنال‌های ضعیف را فراهم می‌کند. این ماژول، داده‌های مکانی را با پروتکل NMEA و با فرکانسی قابل تنظیم بین ۰٫۲۵ تا ۵۰۰۰ هرتز ارائه می‌کند. با توجه به طول نفوذ دریفت در رهگیری جریان‌های ساحلی که معمولاً کمتر از یک کیلومتر است، یک ماژول GPRS برای انتقال آنلاین داده‌ها در نظر گرفته شده است. این ماژول GPRS، یک ماژول ارسال SMS و GSM/GPRS M590 از شرکت NEOWAY برای تبادل دیتا از طریق شبکه تلفن همراه است. این محصول همچنین کانکتور سیمکارت را نیز روی خود دارد که با اتصال به یک آنتن خارجی، یک پکیج کامل برای اتصال به وسایل دیگر می‌باشد. برای ثبت آفلاین داده‌ها، از یک



شکل ۱: طرح‌واره بدنه (راست) و تصویر (وسط) دریفت‌ر با اجزای متعلقه در بدنه‌ای نمونه از جنس پلکسی گلاس و (چپ) دریفت‌ر در حال عملیات
Fig. 1: Scheme of the body (right) and image (middle) of the drifter with the corresponding components in a sample body made of Plexiglas and (left) of the driver in operation



شکل ۲: مقایسه مولفه‌های سرعت موازی ساحل (چپ) و سرعت عمود بر ساحل (راست) دستگاه دریفت‌ر با سرعت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه RCM9
Fig. 2: Comparison of components of parallel shore velocity (left) and perpendicular velocity (right) of drifter with speed measured by RCM9

ساحل کمتر از یک درصد و بستر آن از نوع ماسه‌ای است. بادهای متفاوتی در این منطقه حضور دارند. این بادهای با توجه به جهت وزش و دمای آب که بر میزان تنش برشی سطحی آب موثر است، هرکدام تأثیر ویژه‌ای بر سطح آب دارد. بر اساس الگوی سالانه بادهای منطقه‌ای، غالب‌ترین و شایع‌ترین باد در بهار، بادهای شمال و شمال غرب و شمال شرق هستند. در تابستان گرچه باد شمالی نیز گاهی می‌وزد اما باد جنوب شرق غالب‌ترین باد است. در فصل پاییز، مجدداً باد شمالی بر منطقه حاکم می‌شود و دریا متأثر از رژیم باد، کاملاً موج خواهد بود. در فصل زمستان، به‌عنوان مرحله گذر به شرایط جوی بهاری، به شدت بادهای شمال، شمال شرق و شمال غرب اندکی افزوده شده تا مجدداً در بهار به اوج خود برسد.

در ناحیه جنوب‌غربی خزر، در طول سال امواج شمال غلبه دارد و احتمال رویداد امواج شمال باختری نادر است. بیشترین انرژی وارده نیز از سوی امواج شمالی صورت می‌گیرد. در فصل زمستان فراوانی امواج باختری افزایش می‌یابد. ماه‌های پاییز و زمستان در این ناحیه

هرچند در رنج سرعتی بین ۰٫۲-۰٫۰ متر بر ثانیه، مقادیر خطای جذر میانگین مربعات ۲۲ درصد و ۱۳ درصد، و مقادیر شاخص پراکنش به اندازه ۲۵٫۸ درصد و ۱۱٫۵ درصد رشد دارند که دلالت بر اندازه‌گیری نامطمئن جریان توسط دریفت‌ر در این رنج سرعت دارد

۲. محدوده مطالعاتی و ویژگی‌های جغرافیایی

آب‌های جنوبی دریای خزر همواره شاهد اتفاقات ناگوار برای شناگران بومی و توریستی منطقه بوده است. در این بین به دلیل شیب کمتر ناحیه شمالی و شمال‌غربی استان گیلان، آمار مغروقین در این بخش قابل تأمل بوده است. ساحل شرقی بندر انزلی در حاشیه جنوب‌غربی دریای خزر، به لحاظ پتانسیل بالای گردشگری، از جمله مهم‌ترین نواحی ساحلی است که جریان‌های شکافنده در آن مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۳). عرض نوار ساحلی حدود ۴/۵ کیلومتر از نقطه ۴۹٫۴ درجه شرقی تا ۴۹٫۵۵ درجه شرقی امتداد دارد. شیب این

مدل جریان و لایه‌بندی ROMS، یک مدل سه بعدی، سطح آزاد و زمین مرجع است که معادلات میانگین‌گیری شده‌ی رینولدزی ناویر استوکس را با استفاده از تقریب‌های آب ایستایی و بوسینسک و بهره‌گیری از تکنیک‌های تفاضل محدود حل می‌کند [۲۰]. ROMS مدلی برخوردار از سیستم مختصات عمودی تعمیم یافته است که معادلات پایه را در مختصات منحنی الخط راست گوشه متناسب با مرز حل می‌کند. شبکه عمقی، شرایط مرزی و واداشت جوی یا بالک ورودی‌های مدل و مجموعه‌ای از مشخصات فیزیکی و جریان خروجی‌های آن می‌باشند. مدل امواج SWAN نیز یک مدل نسل سوم در فضای فرکانسی است که اثرات مکانی انتشار، انکسار، کاهش عمق آب، تولید و اتلاف انرژی و اندرکنش‌های غیرخطی موج-موج را در شبیه‌سازی امواج مورد توجه قرار می‌دهد [۲۱]. شبکه عمقی، شرایط مرزی طیف امواج ورودی، واداشت باد برای ایجاد امواج بادرانده و سرعت میانگین برای انکسار حاصل از جریان برای پیکربندی آن لازم هستند تا بتوانند پارامترهای بالکی امواج شامل ارتفاع موج شاخص، پیروید میانگین و تنش‌های تشعشعی را محاسبه نمایند. این مدل برای مناطق ساحلی به‌خوبی توسعه یافته است اما برای امواج آب عمیق نیز از دقت لازم برخوردار است. جفت‌شدگی دوطرفه مدل‌های ROMS و SWAN سبب می‌شود تا جریان‌های برشی قائم، میدان امواج را تصحیح نماید. الگوریتم اندرکنش موج-جریان در سیستم COAWST مبتنی بر جریان‌های گردابی و تفکیک اثرات پایسته و ناپایسته ناشی از موج است.

شکل (۴) شبکه محاسباتی منحنی الخط و متعامد مورد استفاده در منطقه انزلی را که برای هر دو مدل جریان و موج یکسان است نشان می‌دهد. برای این شبکه، داده‌های توپوگرافی SRTM^۱ با رزولوشن افقی ۳۰ متر و داده‌های ژرفاسنجی GEBCO^۲ با رزولوشن افقی نیم درجه جغرافیایی که با داده‌های هیدروگرافی محلی بروزرسانی شده‌اند، استفاده شده است.

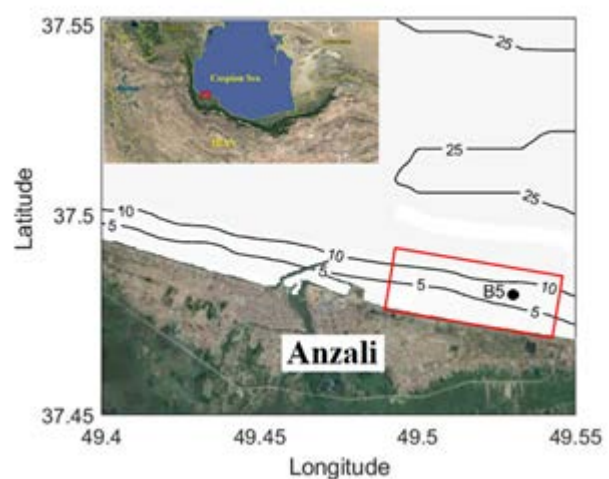
۴. صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی مدل‌سازی انجام شده، مشخصات امواج شبیه‌سازی شده با داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده در نقطه B5 مقایسه و تحلیل گردید (شکل ۵). در ایستگاه B5، الگوی باد تحت تأثیر ویژگی‌های جغرافیایی و عوارض سرزمینی قرار گرفته و از سرعت آن کم می‌شود. در این ایستگاه در بازه زمانی اندازه‌گیری انطباق خوبی بین مشخصات میدانی امواج و نتایج مدل وجود دارد.

علاوه بر بررسی صحت مدل‌سازی امواج و برای صحت‌سنجی مدل‌سازی جریان انجام شده، از ۵ دستگاه دریفت‌ر که در فواصل حدودی ۳۰ متر از یکدیگر بر الگویی متقاطع رهاسازی شده‌اند، استفاده گردید (شکل ۶). عمق رهاسازی دریفت‌رها تقریباً یک متر، ۱٫۵ متر و ۲ متر بوده است. مقایسه مسیر حرکت دریفت‌رها با الگوی جریان ساحلی مدل‌سازی شده،

طوفانی و ماه‌های بهار (آوریل) آرام است. در ناحیه شرقی خزر جنوبی، فراوانی امواج ویژگی خاصی نشان نمی‌دهد. در طول سال امواج شمال باختری غلبه دارد و برخلاف ناحیه غربی امواج شمالی به ندرت رخ می‌دهد. جهت شمال باختری دارای بیشترین خطر امواج است و بیشترین انرژی امواج را دریافت می‌کند. همانند دیگر نواحی در زمستان فراوانی امواج جنوب خاوری افزایش یافته (تا ۲۸٫۱٪ در ژانویه) و در تابستان کاهش می‌یابد (۲٫۵٪ در جولای). امواج حاصل از باد در منتهی‌الیه بخش جنوبی خزر در کرانه‌های ایران، علی‌رغم اندکی ضعیف شدن باد دارای مقادیر قابل ملاحظه‌ای است. به این ترتیب، جریان‌های کرانه‌ای به‌طور دائمی در منطقه حاکم است با این وجود به دلیل مورفولوژی ساحلی، مستعد ایجاد پشته‌های ساحلی و کانال‌های شکافتی است.

برای اطلاع از مقادیر مرزی جریان و موج در خارج از منطقه شکست، و واسنجی مدل عددی از یک دستگاه موج‌نگار آکوستیکی ADCP با فرکانس ۶۰۰ کیلوهرتز در عمق تقریبی ۷٫۵ متر و در فاصله تقریبی ۸۰۰ متر از خط ساحلی برای مدت ۸ روز استفاده گردید (نقطه B5 در شکل ۳).



شکل ۳: منطقه مطالعاتی سواحل شرقی انزلی، جنوب‌غربی دریای خزر و موقعیت دستگاه موج‌نگار (B5)

Fig. 3: East Anzali coastal study area, southwest of the Caspian Sea and the location of the waveguide (B5)

۳. مدل عددی، پیکربندی شبکه‌ها و نیروهای واداشت

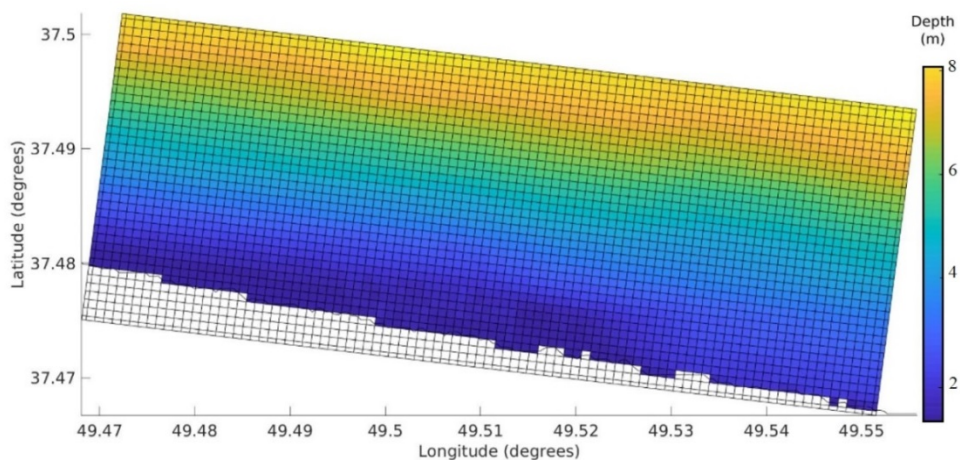
سیستم مدل‌سازی کد باز COAWST یک مدل جفت شده جوی، اقیانوسی، امواج و انتقال رسوب است که به‌صورت ترکیبی از زیرمدل‌ها قابل استفاده می‌باشد [۱۸]. این سیستم، دو مدل گردش ROMS و امواج SWAN را با استفاده از کوپلر MCT جفت نموده است. اعتبار مدل‌سازی توسط سیستم COAWST پیشتر در بررسی‌های متعددی که بر روی اندرکنش موج-جریان در منطقه خیزاب ساحلی انجام شده [۱۹] تأیید شده است.

¹ Shuttle Radar Topography Mission

² The General Bathymetric Chart of the Oceans

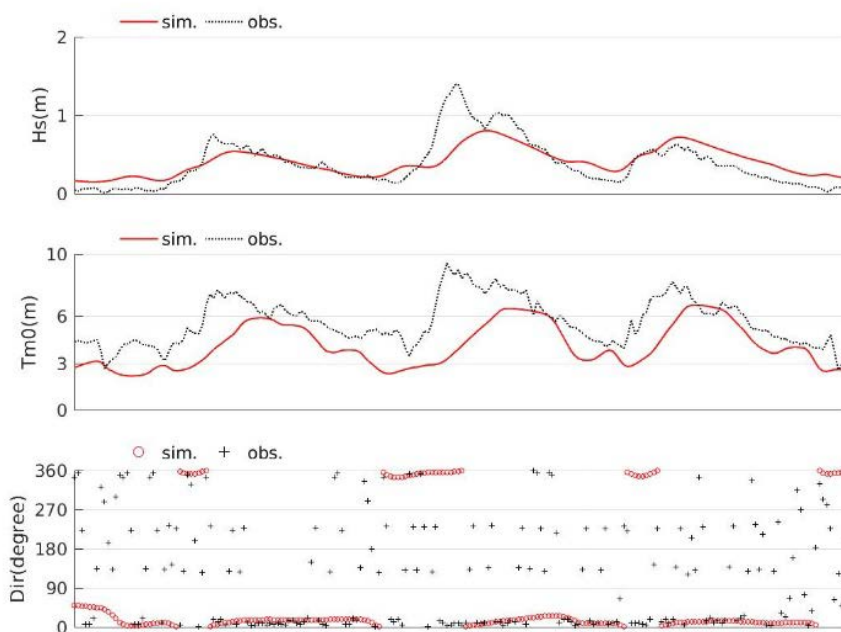
از نتایج مدلسازی و هم از داده‌های رهگیری شده کاملاً مشهود است.

ضمن تأیید عملکرد مدل، چندین کانال جریان شکافنده را نشان می‌دهد. کم بودن قدرت جریان‌های دریاسو نسبت به جریان‌های رو به ساحل هم



شکل ۴: شبکه محاسباتی مدل در سواحل انزلی با رزولوشن افقی ۲۰ متر. سلول‌های شبکه جهت نمایش بهتر با گام ۴:۱ ترسیم شده‌اند.

Fig. 4: Model computing network in Anzali beaches with horizontal resolution of 20 meters. The grid cells are plotted in 4: 1 for better display.



شکل ۵: مقایسه سری زمانی مشخصات امواج حاصل از مدلسازی با مقادیر اندازه‌گیری در ایستگاه B5.

خط چین سیاه و + نماینده مقادیر اندازه‌گیری و خط پر قرمز و 0 نشان‌دهنده مقادیر شبیه‌سازی شده از مدل هستند.

Fig. 5: Comparison of time series of modeling wave characteristics with measured values in station B5,

جدول ۲: پارامترهای آماری امواج بر حسب خطای میانگین (MBE)، خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE)،

ایندکس پراکندگی (SI)، و ضریب همبستگی (CC) در محل بویه‌های M1 و M2 و دستگاه ADCP در ایستگاه B5

Table 2: Statistical parameters of waves in terms of mean error (MBE), mean square root error (RMSE), scattering index (SI), and correlation coefficient (CC) at the locations of M1 and M2 and ADCP at station B5

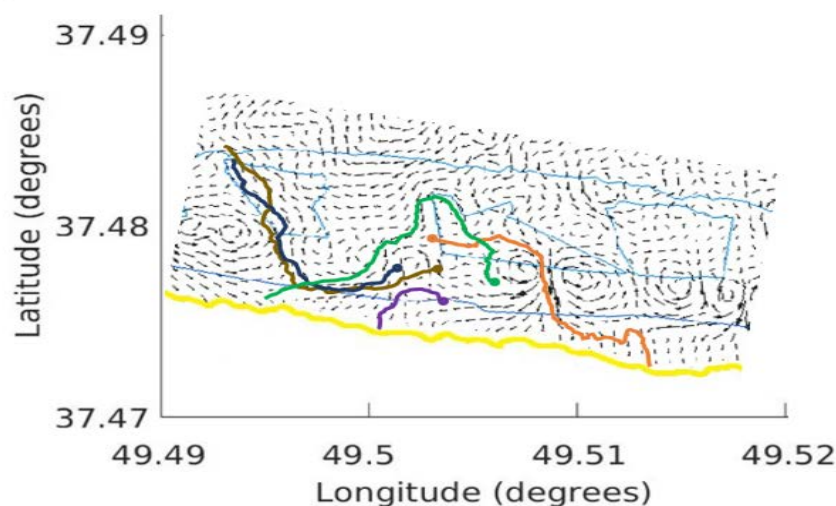
شاخص	Hs (m)	Tp (s)
MBE	۰٫۲	۰٫۰۳
RMSE	۰٫۱۰	۱٫۴۲
SI	۰٫۲۷	۰٫۲۵
CC	۰٫۸۱	۰٫۶۷

بخش مرکزی سواحل جنوبی دریای خزر، نفوذ این جریان‌ها را تا عمق ۸ متری نیز پیش‌بینی کرده است. البته سواحل نوشهر نسبت به دیگر سواحل جنوبی دریای خزر پراورزی‌تر هستند [۲۴] و این اختلاف نظر در عمق نفوذ جریان‌های شکافنده به سمت دریا به همین دلیل است.

میدان ورتیسیتیه نشان داده شده در شکل (۸) وجود چندین سلول جریان‌های شکافنده در طول ساحل را نشان می‌دهد. البته با توجه به رنج مقادیر ورتیسیتیه، این جریان‌ها به جز در چند مورد معدود که در مسیر کانال‌های شکافنده ثابت تشکیل شده‌اند، چندان قوی نیستند.

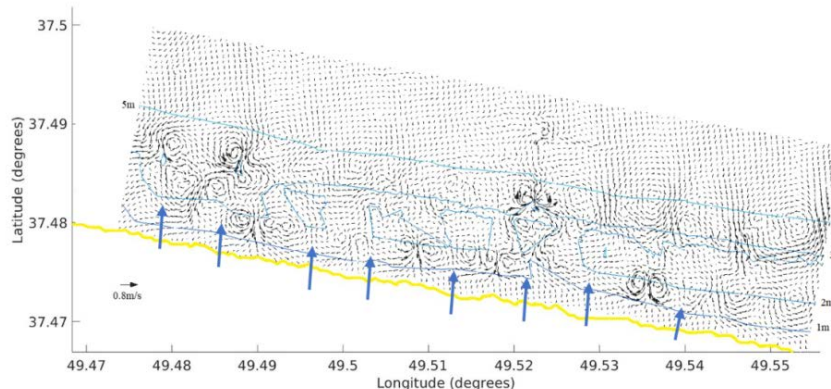
۵. جریان‌های ساحلی

جریان‌های ساحلی حاصل از امواج در بخش خیزاب ساحلی در سواحل شرقی انزلی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۷). جریان‌های شکافنده به فاصله‌های تقریبی ۶۰-۱۰۰ متر از هم تقریباً در تمامی امتداد ساحل شکل گرفته‌اند. فاصله معمول بین کانال‌های شکافنده از چند ده متر تا ۲ الی ۳ کیلومتر گزارش شده است [۲۲]. این جریان‌ها چندان قوی نیستند و از سرعتی کمتر از یک متر برخوردار بوده‌اند. این جریان‌ها تقریباً از خط‌القعر یک متری شکل گرفته و تا عمق ۲ متری وسعت یافته‌اند. هرچند در بعضی مکان‌ها تا عمق ۳ متری نیز گسترش داشته‌اند. کمیجانی [۲۳] در سواحل نوشهر واقع



شکل ۶: مقایسه نتایج مدل‌سازی با ردیابی جریان‌های شکافنده با استفاده از دریغتر در سواحل انزلی

Fig. 6: Comparison of modeling results by tracking rift currents using drifter in Anzali beaches

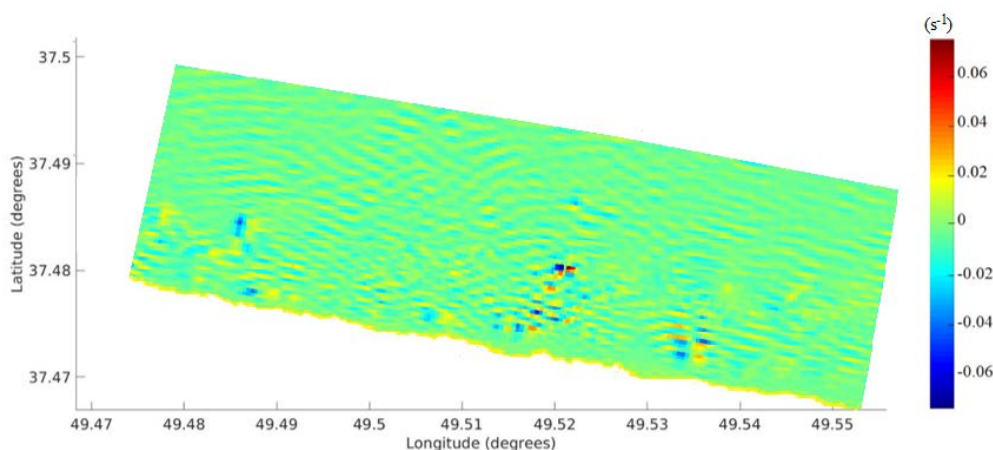


شکل ۷: جریان‌های ساحلی حاصل از مدل‌سازی جریان متوسط عمقی در سواحل انزلی.

پیکان‌ها محل وقوع جریان شکافنده را نشان می‌دهند.

Fig. 7: Coastal currents resulting from modeling of medium deep flow in Anzali coasts.

The arrows indicate the location of the breaker current



شکل ۸: میدان ورتیسیتیه حاصل از مدلسازی جریان در سواحل انزلی

Fig. 8: Vorticity field obtained from flow modeling in Anzali beaches

بوده‌اند. عمده این جریان‌های شکافنده دریا سو بوده و کمتر تحت تأثیر جریان‌های کرانه‌ای بوده‌اند. از این‌رو، مسیر دریفت‌ها نشان می‌دهد که در شرایط معمولی وزش باد از شمال‌غربی، جریان‌های سطح به سمت شرق رانده می‌شوند و به دلیل وجود خط ساحلی می‌چرخند. در شرایط باد شرقی، جریان‌های سطح در درجه اول از شرق به غرب توسعه می‌یابند. [۲۵]

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله نویسندگان سهم یکسانی داشتند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، نمونه اولیه‌ای از یک دریفت‌ر رهگیری جریان سطحی، مناسب برای مناطق خیزاب موج و عملیاتی برای اولین نیم متر از لایه سطحی ارائه کرده‌ایم. این دریفت‌ر با قابلیت ثبت درجا و ارسال آنلاین داده‌های موقعیت مکانی از طریق سیستم‌های GPRS علاوه بر تعیین مسیر جریان مقدار آن را نیز به دست می‌دهد. این دریفت‌ر در شرایط نسیم سبک، در سواحل شرقی انزلی واقع در جنوب‌غربی دریای خزر مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که این میزان سرعت باد دریفت‌ر را چندان تحت تأثیر قرار نمی‌دهد، می‌توان گفت که حرکت دریفت‌ر به احتمال زیاد تنها توسط جریان سطح در دریا هدایت شده است. مدلسازی جریان در آب‌های ساحلی منطقه وجود چندین سلول جریان شکافنده دلالت دارد که مسیر رهگیری شده توسط دریفت‌رها نیز وجود آنها را تأیید کرده است. این جریان‌ها هرچند آنقدر قوی نیستند اما در فواصل بین ۳۰ تا ۶۰ متر قابل تشخیص

References

- Houser C. Public perceptions of a rip current hazard education program: "Break the Grip of the Rip!". *Natur Hazards Earth Sys Sci.* 2017;17(7):1003. doi: 10.5194/nhess-17-1003-2017
- Iranian Legal Medicine Organization. Available from: lmo.ir.
- Bowen AJ. Rip currents: 1. Theoretical investigations. *Geophysic Res.* 1969;74(23):5467-78. doi: 10.1029/JC074i023p05467
- Dalrymple RA. Rip currents and their causes. *Coastal Engineer.* 1978;14:14-27. doi: 10.1061/9780872621909.085
- Murray ABG. Reydelle, A rip current model based on a hypothesized wave/current interaction. *Coastal Res.* 2001;5:17-30.
- Symonds GR. Ransinghe, On the formation of rip currents on a plane beach. *Coastal Engineer.* 2001;468-81. doi: 10.1061/40549(276)37
- G. RB, Miles JR, Feddersen F, Guza R, Elgar S. Modeling the alongshore current on barred beaches. *Geophysic Res Ocean.* 2001;106(C10):22451-63. doi: 10.1029/2000JC000766
- Thornton EB, Guza R. Transformation of wave height distribution. *Geophysic Res Ocean.* 1983;88(C10):5925-38. doi: 10.1029/JC088iC10p05925
- Lumpkin RM. Pazos, Measuring surface currents with SVP drifters, in *Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics*, 2007. Cambridge University Press.

10. Manning JP, McGillicuddy DJ, Pettigrew NR, Churchill JH, Incze LS. Drifter Observations of the Gulf of Maine Coastal Current. *Cont Shelf Res.* 2009;29(7):835-45. **doi:** [10.1016/j.csr.2008.12.008](https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.12.008) **pmid:** 28966432
11. Kouts T, Verjovkina S, Lagema P, Raudsepp U. Use of lightweight on-line GPS drifters for surface current and ice drift observations, 2010. In 2010 IEEE/OES Baltic International Symposium (BALTIC).
12. MacMahan JJ, Brown E, Thornton, Low-cost handheld global positioning system for measuring surf-zone currents. *Coastal Res.* 2009;744-54. **doi:** [10.2112/08-1000.1](https://doi.org/10.2112/08-1000.1)
13. Nasello CV. Armenio, A new small drifter for shallow water basins: Application to the study of surface currents in the Muggia Bay (Italy). *Sensors* 2016.
14. Schmidt WR, Guza D, Slinn, Surf zone currents over irregular bathymetry: Drifter observations and numerical simulations. *Geophysic Res Ocean.* 2005;110(C12015):1-19. **doi:** [10.1029/2004JC002421](https://doi.org/10.1029/2004JC002421)
15. Johnson D, Stocker R, Head R, Imberger J, Pattiaratchi C. A compact, low-cost GPS drifter for use in the oceanic nearshore zone, lakes, and estuaries. *J Atmospheric Oceanic Technol.* 2003;20(12):1880-4. **doi:** [10.1175/1520-0426\(2003\)020<1880:ACLGDF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<1880:ACLGDF>2.0.CO;2)
16. MacMahan J, Brown J, Thornton E. Low-cost handheld global positioning system for measuring surf-zone currents. *J Coastal Res.* 2009;744-54. **doi:** [10.2112/08-1000.1](https://doi.org/10.2112/08-1000.1)
17. Sabet BSGA, Barani, Field investigation of rip currents along the southern coast of the Caspian Sea. *Scientia Iran.* 2011;18(4):878-84. **doi:** [10.1016/j.scient.2011.07.017](https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.07.017)
18. Warner JC, Armstrong B, He R, Zambon JB. Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean Model.* 2010;35(3):230-44. **doi:** [10.1016/j.ocemod.2010.07.010](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.07.010)
19. Kumar N, G., Voulgaris JCJCE. Warner, Implementation and modification of a three-dimensional radiation stress formulation for surf zone and rip-current applications. 2011;58(12):1097-117. **doi:** [10.1016/j.coastaleng.2011.06.009](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.06.009)
20. Shchepetkin AF, McWilliams JC. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Model.* 2005;9(4):347-404. **doi:** [10.1016/j.ocemod.2004.08.002](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002)
21. Booij NRRC, Ris RC, Holthuijsen LH. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *J Geophysic Res Ocean.* 1999;104(C4):7649-66. **doi:** [10.1029/98JC02622](https://doi.org/10.1029/98JC02622)
22. Calvete D, Dodd N, Falqués A, Van Leeuwen SM. Morphological development of rip channel systems: Normal and near-normal wave incidence. *J Geophysic Res Ocean.* 2005;110(C10). **doi:** [10.1029/2004JC002803](https://doi.org/10.1029/2004JC002803)
23. Komijani F. Controls on the occurrence of various types of rip current along the Mazandaran Coast-Southern Caspian Sea. NISCAIR-CSIR, India. 2017.
24. Kamranzad B, Etemad-Shahidi A, Chegini VJE. Sustainability of wave energy resources in southern Caspian Sea. 2016;97:549-59. **doi:** [10.1016/j.energy.2015.11.063](https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.063)
25. DDC U. LEA-5 module series. LEA. 2009;18(17):16.

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

Akbarpour Jannat, M.R., Assistant Professor, Coastal Engineering, Iranian National Institute of Oceanography and Atmospheric Science (INIOAS), Tehran, Iran

✉ akbarpour@inio.ac.ir

 0000-0003-1850-9617

Noraniyan Esfahani, M., PhD in Marine and Oceanic Sciences (Marine Physics), Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science (INIOAS); Tehran, Iran

✉ majid.noraniyan@inio.ac.ir

 0000-0002-1599-5130



HOW TO CITE THIS ARTICLE

Citation (Vancouver) Akbarpour Jannat, M.R., Noraniyan Esfahani, M. Investigation of High-risk Zones in Anzali Coasts Associated with Rip Currents Using Field Measurement and Coupled Wave-current Numerical Model (ROMS-SWAN). *J Oceanography*. 2021; 11(44): 95-105.

 <http://doi.org/10.12345/joc.11.44.95>

 <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1665-fa.html>

 <https://orcid.org/0000-0002-8311-5238>



COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.